

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

HELOISA FUGANTI CAMPOS

CONCRETO DE ALTA RESISTÊNCIA UTILIZANDO PÓ DE PEDRA COMO  
SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO CIMENTO PORTLAND: ESTUDO EXPERIMENTAL

CURITIBA

2015

HELOISA FUGANTI CAMPOS

CONCRETO DE ALTA RESISTÊNCIA UTILIZANDO PÓ DE PEDRA COMO  
SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO CIMENTO PORTLAND: ESTUDO EXPERIMENTAL

Dissertação apresentada como requisito parcial à  
obtenção do grau de Mestre em Engenharia de  
Construção Civil, Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia de Construção Civil, Setor de  
Tecnologia, Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. José Marques Filho

CURITIBA

2015

---

C198c

Campos, Heloisa Fuganti

Concreto de alta resistência utilizando pó de pedra como substituição parcial do cimento portland : estudo experimental/ Heloisa Fuganti Campos. – Curitiba, 2015.

148 f. : il. color. ; 30 cm.

Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-graduação em Engenharia de Construção Civil, 2015.

Orientador: José Marques Filho .

Bibliografia: p. 128-135.

1. Pedras para construção. 2. Concreto de alta resistência. 3. Sustentabilidade. I. Universidade Federal do Paraná. II. Marques Filho, José. III. Título.

CDD: 620.136

---

## TERMO DE APROVAÇÃO

HELOISA FUGANTI CAMPOS

### CONCRETO DE ALTA RESISTÊNCIA UTILIZANDO PÓ DE PEDRA COMO SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO CIMENTO PORTLAND: ESTUDO EXPERIMENTAL

Dissertação aprovada como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre no Programa de Pós Graduação em Engenharia de Construção Civil, Área de Concentração: Materiais e Estruturas. Setor de Tecnologia, da Universidade Federal do Paraná, pela seguinte banca examinadora:

Orientador:



Prof. Dr. José Marques Filho

Programa de Pós Graduação em Engenharia de Construção Civil –  
UFPR

Examinadores:



Profª. Drª. Nayara Soares Klein

Programa de Pós Graduação em Engenharia de Construção Civil –  
UFPR



Prof. Dr. Adalberto Matoski

Departamento de Construção Civil – UTFPR

Curitiba, 30 de abril de 2015.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao meu orientador, Prof. Dr. José Marques Filho, pelos ensinamentos, contribuições e colaborações que com sua admirável dedicação ao ensino e à pesquisa me ajudaram desde a elaboração do tema desta dissertação e em todas as etapas para a realização.

À minha família, que desde o surgimento da minha vontade em enfrentar o desafio do mestrado, sempre me apoiou e incentivou. Em especial ao meu pai, Prof. Dr. Antônio Carlos Ligocki Campos, que além do enorme incentivo cotidiano às pesquisas científicas, do exemplo como profissional e pesquisador, colaborou em todas as etapas para a realização deste trabalho.

Ao meu namorado José Lucas pelo amor, dedicação, companheirismo, compreensão durante todos os momentos e pela ajuda essencial nos momentos mais difíceis.

Meu especial agradecimento aos colegas do mestrado Dayana Ruth, Leonardo Hoffmann, Alan Polucha e Ícaro Santos e aos demais colegas Gabriel Molini e Lucas Aguiar, pela amizade, colaboração, contribuição na obtenção dos materiais e nos ensaios preliminares.

Aos técnicos de laboratório e toda à equipe do LAME/DCC pela contribuição na execução dos ensaios nas pastas de cimento Portland e nas argamassas.

Ao Jeferson Bronholo, ao Bruno Ribeiro e toda à equipe do LACTEC, que contribuíram na produção do concreto de alta resistência e no desenvolvimento dos ensaios no laboratório.

A Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Nayara Klein e toda equipe do LAMIR, pela contribuição na execução dos ensaios para obtenção das curvas granulométricas do pó de pedra e do cimento Portland.

Às empresas Companhia de Cimentos Itambé e Grace, que gentilmente forneceram todos os materiais necessários à produção dos concretos estudados.

CAMPOS, H. F. **Concreto de alta resistência utilizando pó de pedra como substituição parcial do cimento Portland: Estudo experimental.** Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

## RESUMO

O emprego do concreto de alta resistência (CAR) leva ao melhor aproveitamento dos recursos naturais devido à maior durabilidade das estruturas e à minimização do consumo de matérias primas nobres, pela redução do volume de concreto. Em sua composição, a utilização de areia artificial em substituição à natural reduz os impactos ambientais ocasionados pelo processo convencional de extração de areia e garante, além da diminuição do custo de transporte, menor variabilidade das características do agregado. Além da areia artificial, o processo de cominuição das rochas gera pó de pedra que acaba sendo estocado ao ar livre, gerando danos ambientais. Nesse contexto, o objetivo do trabalho é analisar a influência da utilização do pó de pedra em substituição parcial do cimento Portland no CAR. As propriedades avaliadas são: resistência à compressão, à tração por compressão diametral e módulo de elasticidade.

Os concretos foram produzidos com quatro níveis de resistência: 50MPa, 65MPa, 80MPa e 95MPa e com quatro teores de pó de pedra em substituição ao aglomerante, 0%, 6%, 12% e 18%.

Os resultados obtidos mostram que com a substituição parcial do cimento Portland pelo pó de pedra no concreto de alta resistência produzido com areia artificial é possível reduzir significativamente o consumo de cimento. A maior redução, em média 33,09%, foi com 18% de substituição. Os melhores resultados encontrados nos parâmetros mecânicos foram com 12% de substituição, sendo que com esse teor é possível reduzir 22,05% o consumo de cimento, com o aumento médio de 13,73% na resistência à compressão, 15,22% na resistência à tração por compressão diametral e 7,03% no módulo de elasticidade, em relação aos concretos produzidos sem a substituição do cimento Portland pelo pó de pedra. Também é relevante a diminuição das emissões de CO<sub>2</sub> por unidade de resistência, bem como a solução pode ser significativa em termos de custo.

Palavras – chave: pó de pedra; concreto de alta resistência; sustentabilidade.

CAMPOS, H. F. **High strength concrete produced with partial replacement of Portland cement by stone power: Experimental study.** Dissertation (Master Degree on Construction Engineering) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

## **ABSTRACT**

The use of high strength concrete (CAR) leads to a better use of natural resources. This is due to increased durability of structures while minimizing the consumption of noble raw materials, because of reduction in concrete volume. In its composition, the use of artificial sand to replace natural sand reduces the environmental impact caused by the conventional method of extraction of sand. In addition, this ensures lowering in transportation costs and reduced variability of aggregate characteristics. In addition to artificial sand, the rock comminuting process creates stone dust which is stored outdoors, causing environmental damage. In this context, the objective of this study is to analyze the influence of the use of stone powder as a partial replacement in Portland cement in high-strength concrete. The properties evaluated are: compressive strength, tensile strength by diametrical compression and elastic modulus.

The concrete was produced with four levels of resistance: 50MPa, 65MPa, 80MPa and 95MPa; and with four different stone powder contents to replace the cement; 0%, 6%, 12% and 18%.

The results show that with the partial replacement of Portland cement by stone power in high strength concrete produced with artificial sand it is possible to significantly reduce cement consumption. The best mean general reduction, 33.09%, was obtained with 18% substitution. The best results found in the mechanical parameters were with 12% substitution. With this amount of substitution, an average of 13.73% increase in compressive strength, 15.22% in tensile strength by diametrical compression and 7.03% for the tensile modulus were observed as compared to concrete produced without replacing the Portland cement. Also relevant is the reduction of CO<sub>2</sub> emission per unit of resistance. This solution can be also significant in terms of costs reduction.

**Keywords:** sustainability, high-strength concrete, stone powder.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 01 - CONFEDERATION BRIGDE E PETRONAS TOWERS .....	27
FIGURA 02 - EDIFÍCIO E-TOWER, SÃO PAULO.....	29
FIGURA 03 - MUSEU OSCAR NIEMEYER .....	29
FIGURA 04 - EVOLUTION TOWERS .....	30
FIGURA 05 - EFEITO MICROFILER DA SÍLICA ATIVA NO CONCRETO .....	35
FIGURA 06 - MICROESTRUTURA DO CONCRETO .....	45
FIGURA 07 – FLUXOGRAMA DO MÉTODO DE AÏTCIN .....	50
FIGURA 08 - RELAÇÃO A/A X RESISTÊNCIA AOS 28 DIAS.....	51
FIGURA 09 - ÁBACO PARA DETERMINAÇÃO DA QUANTIDADE DE ÁGUA MÉTODO AÏTCIN.....	51
FIGURA 10 - ÁBACO PARA DETERMINAÇÃO DA QUANTIDADE DE AGREGADO GRAÚDO MÉTODO AÏTCIN .....	52
FIGURA 11 - VISTA GERAL DE UMA PLANTA DE PEDREIRA: DA BRITAGEM PRIMÁRIA (ESQUERDA - 2) À PILHA DE PÓ-DEPEDRA (DIREITA – 8) .....	57
FIGURA 12 - PÓ DE PEDRA ESTOCADO EM PEDREIRAS .....	60
FIGURA 13 - EFEITO DA QUANTIDADE E DO TAMANHO DAS PARTÍCULAS NA EFICIÊNCIA DE EMPACOTAMENTO .....	63
FIGURA 14 - INTERAÇÃO PARCIAL DE UMA MISTURA BINÁRIA .....	64
FIGURA 15 - EFEITO PAREDE .....	64
FIGURA 16 – DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA CVP - ARI .....	69
FIGURA 17 – DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA AGREGADO MIÚDO .....	70
FIGURA 18 – PÓ COLETADO EM PEDREIRA .....	71
FIGURA 19 – DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA PÓ DE PEDRA .....	72
FIGURA 20 – DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA BRITA .....	73
FIGURA 21 – MISTURA DOS MATERIAIS NA ARGAMASSADEIRA .....	77
FIGURA 22 – ENSAIO REALIZADO: MESA DE CONSISTÊNCIA .....	77
FIGURA 23 – ENSAIO REALIZADO MINICONE DE KANTRO .....	78
FIGURA 24 – CORPOS DE PROVA - ARGAMASSA .....	79
FIGURA 25 – ROMPIMENTOS CORPOS DE PROVA - ARGAMASSA .....	79
FIGURA 26 – BETONEIRA UTILIZADA.....	86
FIGURA 27 – CORPOS DE PROVA ADENSADOS EM MESA VIBRATÓRIA .....	87
FIGURA 28 – CORPOS DE PROVA COBERTOS COM FILME DE PVC.....	88



FIGURA 29 – CORPOS DE PROVA EM CÂMARA ÚMIDA NO LABORATÓRIO.....	88
FIGURA 30 – RETIFICAÇÃO CORPOS DE PROVA .....	89
FIGURA 31 – ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO NOS CPS DE CAR ..	90
FIGURA 32 – ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL NOS CPS DE CAR .....	90
FIGURA 33 – MEDIÇÃO DA DEFORMAÇÃO COM EXTENSÔMETRO NOS CPS DE CAR.....	90
FIGURA 34 – % SUPERPLASTIFICANTE X PÓ DE PEDRA: MESA DE CONSISTÊNCIA .....	91
FIGURA 35 – % SUPERPLASTIFICANTE X PÓ DE PEDRA: CONE DE KANTRO ..	92
FIGURA 36 – RESULTADOS RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO ARGAMASSAS ...	95
FIGURA 37 – TEOR ÓTIMO DE SUPERPLASTIFICANTE .....	97
FIGURA 38 – CONSISTÊNCIA DA PASTA DE CIMENTO PRODUZIDA COM PÓ DE PEDRA NA CONDIÇÃO REAL .....	99
FIGURA 39 – CONSISTÊNCIA DA PASTA DE CIMENTO PRODUZIDA COM PÓ DE PEDRA NA CONDIÇÃO REAL X CONSISTÊNCIA DA PASTA DE CIMENTO PRODUZIDA COM PÓ DE PEDRA PASSANTE NA % 200 .....	100
FIGURA 40 – FIGURA 39: RELAÇÃO ENTRE AS RESISTÊNCIAS À COMPRESSÃO (MPa) PARA AS RELAÇÕES A/AGLOMERANTE .....	104
FIGURA 41 – RELAÇÃO ENTRE A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (MPa) PARA AS RELAÇÕES A/AGLOMERANTE ENSAIADAS COM 0% DE PÓ DE PEDRA. ...	106
FIGURA 42 – RELAÇÃO ENTRE A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (MPa) PARA AS RELAÇÕES A/AGLOMERANTE ENSAIADAS COM 6% DE PÓ DE PEDRA. ...	107
FIGURA 43 – RELAÇÃO ENTRE A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (MPa) PARA AS RELAÇÕES A/AGLOMERANTE ENSAIADAS COM 12% DE PÓ DE PEDRA. ...	108
FIGURA 44 – RELAÇÃO ENTRE A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (MPa) PARA AS RELAÇÕES A/AGLOMERANTE ENSAIADAS COM 18% DE PÓ DE PEDRA. ...	109
FIGURA 45 – RESISTÊNCIAS À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL (MPa) PARA AS RELAÇÕES A/AGLOMERANTE ENSAIADAS. ....	111
FIGURA 46 – EMISSÃO DE CO <sub>2</sub> /MPa <i>VERSUS</i> RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO .....	119
FIGURA 47 – CO <sub>2</sub> /MPa <i>VERSUS</i> % DE PÓ DE PEDRA.....	120
FIGURA 48 – R\$/MPa <i>VERSUS</i> RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO .....	122
FIGURA 49 – R\$/MPa <i>VERSUS</i> % DE PÓ DE PEDRA.....	123

## LISTA DE TABELAS

TABELA 01 – TRAÇO – ARGAMASSA.....	75
TABELA 02 – FATORES CONTROLÁVEIS – ARGAMASSA .....	76
TABELA 03 – TRAÇO – PASTA DE CIMENTO .....	80
TABELA 04 – FAIXAS DE RESISTÊNCIAS ESPERADAS .....	82
TABELA 05 – DEFINIÇÃO DOS CPs.....	82
TABELA 06 – PARÂMETROS DE PROCESSO .....	83
TABELA 07 – VARIÁVEIS DE REPOSTA.....	83
TABELA 08 – FATORES DE RUÍDO .....	83
TABELA 09 – DOSAGEM UTILIZADA NOS TRAÇOS COM 0% DE PÓ .....	84
TABELA 10 – DOSAGEM UTILIZADA NOS TRAÇOS COM 6% DE PÓ .....	85
TABELA 11 – DOSAGEM UTILIZADA NOS TRAÇOS COM 12% DE PÓ .....	85
TABELA 12 – DOSAGEM UTILIZADA NOS TRAÇOS COM 18% DE PÓ .....	86
TABELA 13 – ANOVA PARA COMPATIBILIDADE ADITIVO E FINOS – FLOW .....	92
TABELA 14 – ANOVA PARA COMPATIBILIDADE ADITIVO E FINOS – CONE DE KANTRO .....	93
TABELA 15 – ANOVA PARA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DA ARGAMASSA .....	95
TABELA 16 – ANOVA PARA TEOR ÓTIMO DE SUPERPLASTIFICANTE .....	98
TABELA 17 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA PARA EFEITO DO PENEIRAMENTO NA #200 EM LABORATÓRIO .....	100
TABELA 18 – RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DOS CONCRETOS (MPa).....	101
TABELA 19 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA PARA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL .....	103
TABELA 20 – COMPARAÇÃO ENTRE CONCRETOS PRODUZIDOS E BIBLIOGRAFIA .....	105
TABELA 21 – EQUAÇÕES DE REGRESSÃO E R <sup>2</sup> PARA OS VALORES MÉDIOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO .....	110
TABELA 22 – EQUAÇÕES DE REGRESSÃO E R <sup>2</sup> AJUTADOS PARA OS VALORES MÉDIOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AOS 28 DIAS COM 12% DE PÓ DE PEDRA .....	110
TABELA 23– RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL DOS CONCRETOS (MPa).....	111

TABELA 24 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA PARA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL .....	112
TABELA 25 – RESUMO DOS RESULTADOS DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL DOS CONCRETOS (MPa) E COMPARAÇÃO COM A BIBLIOGRAFIA .....	113
TABELA 26 – EQUAÇÕES DE REGRESSÃO E R <sup>2</sup> PARA OS VALORES MÉDIOS DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL .....	114
TABELA 27 – EQUAÇÕES DE REGRESSÃO E R <sup>2</sup> AJUTADOS PARA OS VALORES MÉDIOS DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL COM 12% DE PÓ DE PEDRA .....	114
TABELA 28 – MÓDULOS DE ELASTICIDADES DOS CONCRETOS (GPa) .....	115
TABELA 29– ANOVA PARA MÓDULOS DE ELASTICIDADES DOS CONCRETOS (GPa).....	115
TABELA 30– RESUMO DOS RESULTADOS DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DOS CONCRETOS (GPa) E COMPARAÇÃO COM A BIBLIOGRAFIA.....	116
TABELA 31– CONSUMO DE CIMENTO VERSUS PARÂMETROS MECÂNICOS.	117
TABELA 32– EMISSÃO DE CO <sub>2</sub> /MPa CONCRETOS USUAIS (KG) .....	118
TABELA 33– EMISSÃO DE CO <sub>2</sub> /MPa CONCRETOS PRODUZIDOS NO PRESENTE TRABALHO (KG) .....	119
TABELA 34– CUSTOS DAS MATÉRIAS PRIMAS EMPREGADAS (R\$/KG) .....	121
TABELA 35– CUSTO VERSUS RESISTÊNCIA PARA CADA TRAÇO (R\$/MPa) ..	121
TABELA 36– R\$/MPa DE CONCRETOS USUAIS .....	122

## LISTA DE QUADROS

QUADRO 01 - EDIFÍCIOS EXECUTADOS COM CAR .....	28
QUADRO 02 - RESUMO DOS QUANTITATIVOS PARA CADA UMA DAS TRÊS ALTERNATIVAS .....	31
QUADRO 03 - RELAÇÃO ENTRE OS AGREGADOS MIÚDOS E GRAÚDOS CONFORME A RESISTÊNCIA .....	49
QUADRO 04 - CLASSIFICAÇÃO MINERALÓGICA DE ROCHAS DESTINADAS A PRODUÇÃO DE AGREGADOS .....	55
QUADRO 05 - PENEIRAS DA SÉRIE NORMAL E INTERMEDIÁRIA E RESPECTIVAS ABERTURAS NOMINAIS .....	55
QUADRO 06 - LIMITES PARA SUBSTÂNCIAS NOCIVAS PRESENTES NOS AGREGADOS .....	61
QUADRO 07 – ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS CP V-ARI .....	69
QUADRO 08 – GRANULOMETRIA CP V-ARI .....	69
QUADRO 09 – CARACTERIZAÇÃO GRANULOMÉTRICA AGREGADO MIÚDO ...	70
QUADRO 10 – CARACTERÍSTICAS AGREGADO MIÚDO .....	70
QUADRO 11 – CARACTERIZAÇÃO PÓ DE PEDRA .....	71
QUADRO 12 – CARACTERIZAÇÃO GRANULOMÉTRICA AGREGADO GRAÚDO. .....	72
QUADRO 13 – CARACTERÍSTICAS AGREGADO GRAÚDO .....	72
QUADRO 14 – ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS – SÍLICA ATIVA .....	73
QUADRO 15 – ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS SUPERPLASTIFICANTE .....	74

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

a/a – Relação água aglomerante

a/c – Relação água cimento

ACI - American Concrete Institute

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANOVA – Análise de variância

CAD – Concreto de alto desempenho

CAR – Concreto de alta resistência

cm – Centímetro

CO<sub>2</sub> – Dióxido de carbono

CP – Corpo de prova

C40 – Concreto de cimento Portland com 40MPa

C60 – Concreto de cimento Portland com 60MPa

C80 - Concreto de cimento Portland com 80MPa

C-S-H – Silicato de Cálcio Hidratado

C-H – Hidróxido de cálcio

CP – Cimento Portland

DMC - Diâmetro Máximo Característico

E – Módulo de Elasticidade

ELS – Estado Limite de Serviço

Fck – Resistência do concreto à compressão

GJ – Giga joule

IBAMA – Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis

INMETRO – Instituto Nacional de Metodologia, Normatização e Qualidade Industrial

IPCC – *Intergovernmental Panel on Climate Change*

kg – Quilograma

L – Litros

LACTEC – Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento

LAME – Laboratório de materiais e estruturas

LAMIR – Laboratório de Análises de Minerais e Rochas

MPa – Megapascal

m<sup>2</sup> – Metro quadrado

m<sup>3</sup> – Metro cúbico

NBR – Norma Brasileira

PCA - *Portland Cement Association*

PPGECC – Programa de Pós Graduação em Engenharia de Construção Civil

$R^2$  - Coeficiente de determinação da equação de curvas de tendência

SiO – Óxido de silício

SiO<sub>2</sub> - Dióxido de silício

SP - Superplastificante

ZT – Zona de transição

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>13</b>
1.1	PROBLEMA DA PESQUISA.....	14
1.2	OBJETIVO .....	17
1.2.1	Objetivo geral .....	17
1.2.2	Objetivos específicos.....	17
1.3	HIPÓTESE.....	18
1.4	JUSTIFICATIVA.....	19
1.5	LIMITAÇÕES DA PESQUISA .....	21
1.6	ESTRUTURA DA PESQUISA.....	22
<b>2</b>	<b>CONCRETO DE ALTA RESISTÊNCIA .....</b>	<b>23</b>
2.1	GENERALIDADES .....	23
2.2	DEFINIÇÃO DO CAR .....	24
2.3	HISTÓRICO .....	27
2.4	APLICAÇÕES .....	28
2.5	VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA.....	30
2.6	MATERIAIS CONSTITUINTES.....	31
2.6.1	Cimento .....	32
2.6.2	Agregado.....	32
2.6.3	Sílica ativa .....	33
2.6.4	Aditivo superplastificante .....	35
2.6.5	Água de amassamento.....	39
2.7	PROPRIEDADES DO CAR NO ESTADO FRESCO.....	39
2.8	PROPRIEDADES DO CAR NO ESTADO ENDURECIDO.....	40
2.8.1	Resistência à compressão.....	40
2.8.2	Resistência à tração por compressão diametral .....	42
2.8.3	Módulo de elasticidade .....	43
2.8.4	Retração e fluência.....	44
2.9	MICROESTRUTURA DO CAR .....	45
2.9.1	Pasta de cimento .....	45
2.9.2	Fase agregados.....	46
2.9.3	Zona de transição .....	46
2.10	MÉTODOS DE DOSAGEM DO CAR.....	47
2.10.1	Método Mehta e Aïtcin .....	48
2.10.2	Método Aïtcin.....	50
<b>3</b>	<b>EFEITO DO PÓ DE PEDRA NO CONCRETO.....</b>	<b>53</b>
3.1	AGREGADOS.....	53
3.1.1	Generalidades .....	53
3.1.2	Areia artificial .....	57
3.1.3	Pó de pedra .....	59
3.2	CONCRETO COM FINOS .....	60
3.2.1	Empacotamento das partículas .....	62
<b>4</b>	<b>PROGRAMA EXPERIMENTAL .....</b>	<b>66</b>
4.1	MATERIAIS EMPREGADOS .....	68
4.1.1	Cimento .....	68
4.1.2	Agregado miúdo .....	70
4.1.3	Pó de pedra .....	71
4.1.4	Agregado graúdo.....	72

4.1.5	Sílica ativa .....	73
4.1.6	Aditivo superplastificante .....	73
4.2	MÉTODO .....	74
4.2.1	Argamassa .....	74
4.2.2	Pasta de cimento .....	80
4.2.3	Concreto .....	81
4.2.4	Preparação dos corpos de prova de concreto .....	83
<b>5</b>	<b>APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS .....</b>	<b>91</b>
5.1	ARGAMASSA .....	91
5.1.1	Consistência da argamassa .....	91
5.1.2	Resistência à compressão da argamassa .....	95
5.2	PASTA .....	97
5.2.1	Teor ótimo de superplastificante .....	97
5.2.2	Efeito do peneiramento do pó de pedra .....	99
5.3	CONCRETO DE ALTA RESISTÊNCIA .....	101
5.3.1	Resistência à compressão axial .....	101
5.3.2	Resistência à tração por compressão diametral .....	111
5.3.3	Módulo de elasticidade .....	114
<b>6</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>124</b>
6.1	SUGESTÕES PARA NOVAS PESQUISAS .....	126
<b>7</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>128</b>
	<b>ANEXOS .....</b>	<b>136</b>
	ANEXO A .....	137
	ANEXO B .....	138
	ANEXO C .....	139
	ANEXO D .....	140
	ANEXO E .....	141
	ANEXO F .....	143
	ANEXO G .....	145
	ANEXO H .....	147



## 1 INTRODUÇÃO

A deterioração da natureza, em escala global, implica em preocupações com questões ambientais e, paralelamente, com questões sociais e econômicas. Cabe a cada parcela do setor produtivo a redução dos danos ao meio ambiente. A construção civil é considerada uma das mais importantes atividades para o desenvolvimento econômico e social, e tem grande impacto ambiental. Uma forma de minimizar os danos do setor é pela obtenção de uma estrutura mais durável, que necessitará de menos recursos de manutenção e de intervenções ao longo do tempo. O emprego do concreto de alta resistência (CAR) garante maior durabilidade, em geral, e minimiza o consumo de matérias-primas nobres, devido à redução do volume de concreto. Para cada MPa de resistência à compressão, o CAR, quando comparado a concretos convencionais, consome uma quantidade bastante inferior de cimento, tornando-se mais sustentável (BIANCHINI, 2010).

O uso do CAR garante estruturas duráveis aumentando, em geral, a sua vida útil, que caracteriza uma diminuição das quantidades de novos materiais para sua substituição e de resíduos por sua demolição ou reforma. A NBR 6118:2007 exige um desempenho mínimo, representado a partir do conceito de Estado Limite de Serviço (ELS), como a especificação de limites de aberturas de fissuras, de deformações excessivas, entre outros (ISAIA; HELENE; TUTIKIAN, 2011).

A maior parte das emissões de CO<sub>2</sub> do concreto ocorre durante a produção do cimento. Cada tonelada de clínquer gera, em média, 900 kg de CO<sub>2</sub> (MALHOTRA e MEHTA, 2008). Segundo Mehta (2009), uma maneira de reduzir o consumo de clínquer é por meio da substituição do cimento Portland comum por outros materiais.

Além disso, a durabilidade das estruturas de concreto está diretamente ligada à qualidade do concreto, a qual está vinculada a propriedades dos agregados, entre os outros materiais. O agregado miúdo merece atenção especial, uma vez que sofre com a escassez de reservas localizadas próximas aos grandes centros consumidores.

A extração da areia natural é responsável pela retirada da cobertura vegetal, pela degradação dos cursos d'água e por consideráveis prejuízos ao meio ambiente, o que dificulta também a obtenção de licenças ambientais para aproveitamento de

novas jazidas (BARBOSA; COURA; MENDES, 2008). Nesse contexto a substituição da areia natural pelo agregado miúdo de britagem (a areia artificial) aparece como alternativa atraente.

A substituição da areia natural pela artificial leva à redução dos impactos ambientais e à redução do custo da matéria prima. Sua produção é realizada no canteiro das pedreiras, próximas aos grandes centros consumidores, o que reduz o valor do frete. A lavagem desse material gera pó de pedra, caracterizado pelo material passante na peneira #200 (0,075 mm) que é estocado ao ar livre. Segundo Buest Neto (2006), o possível assoreamento de corpos d'água é um agravante antieconômico ao processo produtivo. Aproveitar o pó retirado das jazidas, além de trazer maior lucratividade às empresas, traz benefícios ao meio ambiente.

Dentro desse cenário, pesquisas para solucionar a escassez da areia natural, contribuindo para a utilização de materiais decorrentes da britagem das rochas em substituição ao cimento no CAR são particularmente importantes em direção ao desenvolvimento sustentável.

## 1.1 PROBLEMA DA PESQUISA

O concreto, depois da água, é o material mais consumido pelo homem e também o mais amplamente utilizado em construções, quando bem dosado e executado, devido à sua capacidade de fornecer excelentes propriedades mecânicas a um relativo baixo custo, sendo um material imprescindível para o progresso da civilização (MEHTA e MONTEIRO, 2008). A facilidade de produção, liberdade na escolha da forma, comparado com outros materiais estruturais, permitem a ampla aplicação do concreto, tornando-o alvo de grande volume de estudos e pesquisas.

Em contrapartida, o setor da construção civil, em termos ambientais, é responsável por cerca de 3% do total de emissões de CO<sub>2</sub> para a atmosfera (IPCC, 2014). Durante o ciclo de vida do cimento, a maior parte das emissões de CO<sub>2</sub> é na etapa de produção. As grandes emissões nas usinas são ocasionadas principalmente na produção do clínquer - pela alta temperatura do forno rotativo, o qual consome grandes volumes de combustíveis - e à decomposição química das matérias-primas (HENDRIKS *et al*, 2004).

Além disso, a construção civil é responsável por elevado consumo de matérias primas, em países como o Reino Unido, o consumo de materiais de construção civil é de aproximadamente 6 toneladas/ano/habitante. No Brasil, já a cerca de dez anos atrás, o consumo de agregados naturais somente na produção de concreto e argamassas era de 220 milhões de toneladas /ano (JOHN, 2005).

O aumento da população mundial e as necessidades implícitas em termos de construção de edifícios e outras obras de infraestrutura, agravará ainda mais o consumo de matérias-primas não renováveis, bem como a produção de resíduos (JALALI e TOGAL, 2008). Segundo o IPCC (2007), a produção do concreto influencia diretamente os problemas ambientais devido às emissões de CO<sub>2</sub>.

O relatório mais recente, IPCC (2014), afirma que o setor de construção civil, em 2010, foi responsável por 32% do consumo final de energia e que com uma demanda crescente por energia, as emissões de CO<sub>2</sub> na área deverão aumentar de 50 a 150% até 2050. Além disso, o documento aponta que entre 1970 e 2000, o crescimento médio das emissões de CO<sub>2</sub> foi de 1,3% por ano, enquanto entre 2000 e 2010 saltou para 2,2% por ano.

O consumo de energia associado ao processo de fabricação do cimento é extremamente elevado, sendo apenas superado pela produção de alumínio e de aço, atingindo valores próximos a 4 GJ por tonelada (CAMÕES, 2005).

O aumento do consumo de recursos, a geração de resíduos, e as emissões gasosas resultam na degradação do meio ambiente e, conseqüentemente, cada vez há maior preocupação com questões ambientais e, paralelamente, com questões sociais e econômicas. De forma a garantir um desenvolvimento presente e futuro das próximas gerações, o conceito de desenvolvimento sustentável entrou em constante discussão.

Em 1999, Mehta já afirmava que a indústria do concreto tinha papel fundamental na infraestrutura e, como representava a maior consumidora de reservas naturais, a mesma possuía a obrigação de incorporar tecnologias adequadas, que procurassem minimizar os agentes potenciais de problemas ambientais. Assim, atualmente, percebe-se que, além de fornecer material de construção de menor custo, a indústria do cimento deve assumir o seu papel social na conservação das reservas naturais.

Como já mencionada, devido à necessidade de infraestrutura na sociedade atual, a indústria do concreto tem papel decisivo para o desenvolvimento sustentável.

A escolha adequada dos materiais de construção pode contribuir de forma decisiva para diminuir a quantidade de energia necessária na construção de edifícios e pode reduzir em quase 30% as emissões de CO<sub>2</sub>. A energia necessária ao transporte dos materiais implica necessariamente que se devam utilizar materiais locais (JALALI e TORGAL, 2008).

A extração do agregado miúdo natural está cada vez mais impedida de ser feita em locais próximos. Segundo Barbosa, Coura e Mendes (2008), a grande parte do agregado miúdo natural extraído de leitos de rios é responsável pela retirada da cobertura vegetal, pela degradação dos cursos d'água e por consideráveis prejuízos ao meio ambiente. Órgãos responsáveis pela fiscalização do meio ambiente, como o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (Ibama), vêm coibindo essa extração. Dentro desse contexto, os mineradores são forçados a extrair esses agregados em locais cada vez mais distantes do mercado consumidor, o que aumenta o preço final do produto, além da degradação ambiental em fragmentos de rios.

Além disso, a maior variabilidade das características das areias naturais extraídas de rios ao longo do tempo implica em adoção de maiores consumos de cimento para que seja garantida a resistência característica especificada. O somatório destes fatores tem levado concreteiras a optarem pela substituição da areia natural por agregado miúdo de britagem (WEIDMANN, 2008).

A cominuição de rocha gera agregado miúdo de britagem, considerado todo o material passante na peneira 4,75 mm. Dentro desta classificação, para o presente trabalho, areia artificial é o material passante na peneira de malha 4,75 mm, e o pó de pedra apresenta material de granulometria com percentual abaixo de 0,075 mm. Na região metropolitana de Curitiba, esse último material é gerado pela lavagem da areia artificial, é composto de uma polpa muito diluída em água que é disposta em bacias de decantação ou lagoas de captação. Isto faz com que o assoreamento em corpos d'água seja um agravante antieconômico ao processo produtivo (BUEST NETO, 2006).

O pó de pedra estocado nas pedreiras causa alteração da paisagem, criando um impacto ambiental, obstrução de canais de drenagem em virtude da sua deposição e geração de poeira nas operações de britagem. Esse material é estocado ao ar livre, gerando danos ambientais como a poluição atmosférica, assoreamento de rios e contaminação pelo material lixiviado nas áreas de drenagem (SÁ, 2006). Aproveitar o pó retirado das jazidas, além de trazer maior lucratividade às empresas, traz benefícios ao meio ambiente (BUEST NETO, 2006).

## 1.2 OBJETIVO

### 1.2.1 Objetivo geral

Avaliar a influência da substituição parcial do cimento Portland por pó de pedra, proveniente da região metropolitana de Curitiba, nas propriedades de resistência à compressão, à tração por compressão diametral e no módulo de elasticidade, no concreto de alta resistência produzido com areia artificial.

### 1.2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos que se pretende alcançar com a pesquisa são:

- Avaliar a perda de consistência na pasta e na argamassa de cimento Portland com adição de pó de pedra;
- Avaliar a resistência à compressão da argamassa de cimento Portland com adição de pó de pedra;
- Comparar a consistência da pasta de cimento Portland produzida com o pó de pedra que passou pelo processo de peneiramento na #200 em laboratório, com a pasta produzida com o pó sem passar pelo processo de peneiramento em laboratório;
- Comparar as emissões de CO<sub>2</sub> dos concretos produzidos no presente trabalho com concretos convencionais, em relação ao consumo de cimento;
- Analisar a viabilidade econômica dos concretos produzidos.

### 1.3 HIPÓTESE

Já em 1994, BONAVENTI e IRASSAR realizaram ensaios experimentais que provaram o acréscimo da demanda de água para argamassas com agregado miúdo de britagem. No estudo, para argamassas com 5% de agregado miúdo de britagem, o acréscimo de demanda de água foi insignificante, sendo menor que 2%; no entanto, esta demanda cresceu rapidamente quando mais de 10% foi adicionado. Para 20%, o acréscimo de água chegou a 17%.

Menose (2004) obteve resultados satisfatórios quanto ao acréscimo de resistência à compressão do concreto com a utilização de agregado miúdo de britagem. Aos 7 dias, o concreto com 100% de agregado miúdo de britagem obteve um acréscimo de aproximadamente 31% em relação ao concreto normal, sendo que esses valores evoluíram para 66% aos 28 dias e 70% aos 91 dias de idade. O estudo ainda mostrou que o aumento de resistência observado nos concretos com 100% de substituição compensou as condições desfavoráveis de cura que o concreto possa estar submetido. Os ensaios do autor mostraram um acréscimo de aproximadamente 26% de resistência no concreto curado em condições desfavoráveis, em relação ao concreto normal com cura em câmara úmida. Quanto à trabalhabilidade, como já era esperado, o concreto com agregado miúdo de britagem sem aditivo, exigiu uma demanda maior de água para que pudesse apresentar um mesmo abatimento que um concreto produzido com areia natural. Porém esse fato não prejudicou a resistência à compressão em relação ao concreto normal.

Assim, segundo o estudo, para concretos convencionais o agregado miúdo de britagem é um material alternativo à areia natural. Apresentou todos os requisitos necessários a um agregado miúdo, melhorou significativamente a maioria das propriedades do concreto, além de contribuir com a redução de impactos ambientais no processo de produção do concreto.

Bastos (2005) também obteve resultados satisfatórios quanto à resistência à compressão, porém, com aumento da demanda de água. O autor estudou substituições da areia natural pela artificial entre 15 e 70%, em massa, na produção de concretos convencionais com duas faixas de resistência. Para ambos, quanto maior o teor de areia de britagem empregado maior foi a demanda de água e maior

foi à resistência obtida, sendo que o melhor desempenho foi observado para a substituição de 70% da areia natural.

Outra pesquisa similar foi feita em 2006 por Buest Neto. O autor estudou a substituição de agregados miúdos naturais por agregados miúdos britados em concretos de cimento Portland. Os ensaios mecânicos demonstraram que os concretos com agregados britados possuem maior resistência à tração por compressão diametral e a tração na flexão e menor módulo de elasticidade do que os convencionais. Quanto à análise do pó de pedra, o estudo experimental constatou que os teores elevados de material possuem influência na consistência dos concretos, quanto maior o teor, maior o consumo de cimento e maior quantidade de água na mistura, como era o esperado.

Dessa forma, parte-se da hipótese que a utilização de 100% de areia artificial apresentará resultados satisfatórios quanto a propriedades de resistência da argamassa e do CAR. A maior quantidade de partículas finas presente na areia artificial preenche os vazios do concreto, diminuindo a porosidade e aumentando a resistência. Porém, a alta superfície específica dos finos demanda mais água, resultando em redução da trabalhabilidade da argamassa e do concreto, o que leva a um alto consumo de aditivo superplastificante.

Como segunda hipótese, o efeito filler do pó de pedra leva à economia do consumo de cimento Portland, reduzindo a quantidade necessária de cimento e mantendo a resistência desejada. Como a atual pesquisa utiliza superplastificante, espera-se que a redução de água decorrente favoreça essa hipótese.

#### 1.4 JUSTIFICATIVA

Bianchini (2010) afirma que uma possibilidade de minimizar os efeitos deletérios ao meio ambiente do uso de cimento na construção civil é pela diminuição do consumo de cimento por unidade de resistência, que leva à redução das emissões de CO<sub>2</sub>. Para esse fim o CAR aparece como aliado, pois seu emprego leva ao melhor aproveitamento dos recursos naturais, devido à maior durabilidade das estruturas e a minimização do consumo de matérias primas nobres. O autor cita, segundo dados da Supermix Concretos S/A, que um concreto com  $f_{ck}$  de 30 MPa consome, em média, 10 kg de cimento por MPa de resistência à compressão,

enquanto um concreto com  $f_{ck}$  de 100 MPa consome, em média, 4,0 kg de cimento por MPa.

A maior resistência mecânica do CAR leva a um menor consumo de concreto e aço empregados na confecção das estruturas. A maior durabilidade do material, expressa pela distribuição de vida útil de um conjunto de componentes, desempenha uma função importante para a obtenção de uma construção sustentável.

Após a utilização da sílica ativa com superplastificantes, o cimento deixou de ser o fator limitante para a obtenção de maiores resistências, que passam a depender mais diretamente das propriedades dos agregados, que variam de região para região, em função da grande variabilidade das rochas existentes (VANDERLEI, 1999). A presença de agregado miúdo é fundamental para a diminuição dos vazios do esqueleto granular do concreto, dar coesão e travamento, visando manter a integridade da massa. A partir dos novos superplastificantes é possível melhorar e facilitar o uso de materiais mais finos, garantindo o fechamento granular.

Em 2013, a mineração nacional de areia e brita foi de 150 milhões de toneladas, a qual se equipara ao da produção de minério de ferro. No estado do Paraná, a produção anual total de bens minerais para uso como agregado pode atingir cerca de 1.500.000 m<sup>3</sup> de areia e 2.300.000 m<sup>3</sup> de pedra britada, representando a capacidade produtiva instalada (MINEROPAR, 2013).

A substituição da areia natural pela artificial apresenta vantagens ambientais e econômicas. A primeira, pela redução dos impactos ambientais ocasionados pelo processo convencional de extração de areia. A segunda, devido à sua produção ser realizada no canteiro das pedreiras localizadas próximas aos grandes centros urbanos, o que reduz o custo da matéria-prima para o seu maior mercado consumidor, a indústria da construção civil (ALMEIDA e SILVA, 2005).

Menose (2004) já afirmava que a utilização do pó de pedra como substituição parcial do agregado miúdo no concreto vinha sendo analisada, gerando grande interesse. Nessa abordagem, as pedreiras poderiam comercializar um produto oriundo de rejeito que não tinha valor significativo, que causava transtornos no que diz respeito à estocagem e ao meio ambiente. Essa alternativa apresenta diversas vantagens, sendo as principais: aproveitamento integral das pedreiras, sem descarte



de efluentes, menor consumo de cimento na preparação do concreto e solução de problemas ambientais (ALMEIDA e SILVA, 2005).

Em resumo, as justificativas se baseiam no tripé da sustentabilidade onde a questão ambiental é focada na diminuição de resíduos, preservação de mananciais, aumento de durabilidade e diminuição das emissões de gases do efeito estufa, quer seja pela diminuição de clínquer quer pelo menor consumo de combustíveis de transporte. A questão social se dá pela diminuição de trabalho penoso da extração de areia e pela diminuição de atividade em sítios remotos, criando ainda condições de aplicação do concreto mais adequadas pelo uso de aditivos de alto desempenho. Sob o ponto de vista econômico, diminui-se os custos gerados pela disposição de resíduos, pela diminuição das formas estruturais e suas fundações, pela redução do valor do frete e pela utilização integral do material britado.

Esses fatos motivaram o presente trabalho em busca de alternativas para solucionar a escassez de areia natural e os danos ambientais causados pela estocagem de pó de pedra, mediante a substituição total de areia natural por areia artificial e parcial do cimento Portland por pó de pedra. Paralelamente, diminuir as emissões de CO<sub>2</sub> e caminhar a favor das novas tecnologias da construção civil, buscando garantir a durabilidade das estruturas, a partir do concreto de alta resistência.

### 1.5 LIMITAÇÕES DA PESQUISA

A influência da substituição do cimento Portland pelo pó de pedra será analisada em termos de algumas propriedades mecânicas especificadas do CAR, resistência à compressão, à tração por compressão diametral e módulo de elasticidade. Parâmetros referentes à permeabilidade e abrasão não fazem parte do escopo do trabalho.

A pesquisa limita-se à utilização de um tipo de aditivo superplastificante em todos os concretos produzidos. O cimento usado na produção do CAR foi o CP V-ARI, por ser o usado pelas principais concreteiras da região. O teor de sílica ativa foi o mesmo utilizado na pesquisa de Mendes (2002), visto que foi o mais adequado na produção do CAR, com agregados da região metropolitana de Curitiba, sendo empregada em substituição a 8% da massa de cimento.

Visando a futura aplicação dos resultados deste trabalho, foram utilizados agregados de origem calcária e pó de pedra originários de fornecedor comercial de concreto dosado em central.

O método de dosagem utilizado foi o de AITCIN (2000), por ser o mesmo utilizado por Mendes (2002), de forma a garantir a validade externa do experimento e a fim de comparar os resultados com os obtidos pelo autor.

## 1.6 ESTRUTURA DA PESQUISA

Esta dissertação é dividida em 06 capítulos. No primeiro capítulo, apresenta-se a introdução, indicando o problema, a hipótese e a justificativa da pesquisa, seu objetivo e delimitações.

No Capítulo 2 e 3 são apresentadas as revisões bibliográficas dos principais assuntos expostos na dissertação: o CAR e a influência da utilização de finos, em especial do pó de pedra, no concreto.

O estudo experimental desenvolvido, com os materiais e métodos utilizados é exposto no Capítulo 4. No Capítulo 5, efetua-se a análise dos resultados obtidos e conclui-se a pesquisa com as considerações finais apresentadas no Capítulo 6.

## 2 CONCRETO DE ALTA RESISTÊNCIA

Neste capítulo, foi feito um relato da motivação de pesquisas em novas tecnologias do concreto direcionado ao CAR. Foi feita a revisão bibliográfica de conceitos referentes ao CAR, além de suas aplicações, seus materiais constituintes e seus métodos de dosagem.

### 2.1 GENERALIDADES

Na indústria da construção, um meio de reduzir os danos ao meio ambiente é a obtenção de uma estrutura mais durável, que necessitará de menos recursos de manutenção e de intervenções ao longo do tempo (PEREIRA, 2010).

Mehta (2009) dita algumas medidas para atingir tais objetivos:

- a) Diminuição do consumo de concreto mediante otimização dos projetos e do uso do concreto de alta durabilidade;
- b) Redução do consumo de aglomerantes:
  - b1) alteração do critério da aceitação da resistência do concreto de alguns tipos estruturais, por exemplo, fundações, para idades de 56 ou 91 dias;
  - b2) incremento no uso de aditivos plastificantes e de certos tipos de adições minerais, em detrimento do aumento do consumo de água e de cimento, no caso da necessidade de aumentar a trabalhabilidade;
  - b3) redução do volume da pasta, a partir da otimização do tamanho e graduação dos agregados;
- c) Redução do consumo de clínquer, por meio da substituição, entre 50% e 70% do cimento Portland comum por outros materiais cimentícios ou pozolânicos.

Uma medida benéfica em diferentes requisitos para diminuir as emissões de CO<sub>2</sub>, no que diz respeito à cadeia produtiva do concreto, é conciliar o uso do material com maior resistência com questões sustentáveis, como sugere Mehta (2009).

O concreto possui uma fase estável (os agregados) e uma fase evolutiva (a pasta) que pode sofrer retração ou expansão na etapa de endurecimento. Isto conduz à formação de uma zona de transição que se torna o elo mais frágil do concreto convencional. No CAR, a resistência da zona de transição é melhorada devido à redução da relação água/aglomerante ( $A/A$ ) e ao uso de aditivos minerais (TORRICO, 2010).

Em concretos de maior resistência, o cimento Portland é empregado de maneira mais eficiente, explorando-se todo o seu potencial. No concreto convencional o consumo de água maior que o necessário para hidratar o cimento completamente, resulta em microestrutura mais fraca e porosa. Preparar concreto usual pode ser considerado desperdício parcial de energia, uma vez que a produção de cimento Portland demanda muita energia (AİTCIN, 2008).

As vantagens perante o contexto atual e o futuro na conciliação do concreto com o conceito de desenvolvimento sustentável são diversas. O concreto mais resistente e de maior desempenho garante maior durabilidade, minimiza o consumo de matérias-primas nobres, utilizando menores consumos de concreto e aço. Como consequência, o acréscimo da emissão de  $\text{CO}_2$  na atmosfera é inversamente proporcional à da resistência do concreto, em unidade de resistência (BIANCHINI, 2010).

## 2.2 DEFINIÇÃO DO CAR

Para se evitar a mistura de nomenclaturas, onde às vezes CAR é confundido com concreto de alto desempenho (CAD), além da resistência mecânica, a trabalhabilidade, a estética, o acabamento, a integridade, e, principalmente, a durabilidade também determinam o desempenho (ISAIA; HELENE; TUTIKIAN, 2011). No caso dessa dissertação, os estudos focaram apenas na resistência mecânica.

Segundo Aİtcin (2000), na década de 50, os concretos com 35 MPa eram considerados de alta resistência. Já na década dos 70 os concretos atingiam os 60 MPa. Com a chegada dos superplastificantes, nos anos 80 e 90 e com a utilização da sílica ativa, os concretos chegaram a resistências de 100 MPa e a partir de então os concretos podem ser empregados com resistências de 150 MPa.

A NBR 8953:2009 e a NBR 6118:2014 dividem os concretos em duas classes. A classe I abrange concretos de resistência de 20 até 50MPa, com intervalos de 5MPa. Já a classe II, considerada a classe para o CAR, especifica os concretos de 55 até 90MPa. O ACI (2013) adota o mesmo limite de 55MPa para o concreto ser classificado como CAR.

Segundo Isaia, Helene e Tutikian (2011), o princípio básico do CAR está fundamentado na diminuição da porosidade do concreto, por meio da modificação da estrutura dos poros. Para atingir tal objetivo, as seguintes ações são necessárias:

- Diminuição da relação A/A e a quantidade total de água por m<sup>3</sup>, através do uso de aditivos plastificantes e/ou superplastificantes;
- Otimização da granulometria dos agregados para aumentar o esqueleto inerte e obter maior compacidade, utilizando-se agregados graúdos de menor diâmetro máximo e adequada composição granulométrica dos finos;
- Reforço das ligações químicas primárias e secundárias entre as partículas, pelo uso de adições minerais.

Como já mencionado, cabe salientar a diferença do conceito do CAR com o do CAD. Segundo abordagens de autores, como Mehta e Monteiro (2008), a utilização do termo alto desempenho é normalmente utilizada para misturas que possuem alta trabalhabilidade, alta resistência e baixa permeabilidade, garantindo uma longa durabilidade. Em alguns casos o CAD comporta-se como um concreto apenas mais resistente. Assim, afirma-se que o CAR é uma classe particular de CAD, mas nem todo CAD é um CAR. É possível produzir CAD com resistências baixíssimas, se esta característica for a que garanta o alto desempenho do concreto (BIANCHINI, 2010).

As características básicas do CAR, segundo Freitas (2005), são:

- Maior resistência à compressão por custo, peso e volume;
- Diminuição das peças estruturais;
- Mais espaços livres;
- Redução do peso das estruturas;
- Redução das deformações imediatas;

- Redução de fluência;
- Aumento de durabilidade,
- Menor permeabilidade;
- Redução de volume de concreto;
- Maior rapidez de execução.

Bianchini (2010) demonstrou mais uma relevante vantagem alcançada com o uso do CAR. Os custos de produção das estruturas, em virtude da baixa relação A/A obtida, somada ao efeito do uso de adições, que leva a permeabilidade reduzida dos concretos, garante maior durabilidade das estruturas. Estruturas altamente duráveis possuem baixos custos de manutenção em seu ciclo de vida. O mesmo autor, demonstrou que o CAR apresenta um consumo de cimento para a produção de 1 MPa de resistência à compressão aos 28 dias de idade e consequentemente a quantidade de kg de CO<sub>2</sub> para cada MPa de resistência à compressão aos 28 dias de idade bastante inferior aos índices calculados para concretos usais.

Muitos problemas da engenharia moderna são otimizados a partir da utilização do CAR, tais como, demonstrou Freitas (2005):

- Retorno do investimento financeiro mais rápido, pois devido à sua alta resistência nas primeiras idades, permite encurtamento do cronograma das obras;
- Menores custos, por possibilitar mais e melhores opções de relações entre o custo e a resistência à compressão dos diversos concretos;
- Melhor aproveitamento dos recursos ambientais, devido à maior durabilidade das estruturas e sua maior resistência mecânica, minimizando o consumo de matérias primas nobres e permitindo igualmente, projetos arquitetônicos que melhoram o aproveitamento dos espaços nas edificações.

Hoje em dia existe uma série de obras no mundo executadas com CAR. Dentre as mais famosas, têm-se a *Confederation Bridge*, no Canadá e a *Petronas Towers*, em Kuala Lampur, na Malásia, demonstradas na FIGURA 01.



FIGURA 01 – CONFEDERATION BRIDGE E PETRONAS TOWERS  
 FONTE: BIANCHINI (2010)

Pelos motivos apresentados, as novas tecnologias são a tendência para as construções futuras, pela contribuição para a durabilidade das estruturas, diminuição de consumo de materiais não renováveis, diminuição de emissão dos gases do efeito estufa e, conseqüentemente, para a sustentabilidade.

## 2.3 HISTÓRICO

O início da utilização do CAR foi nos anos 60, na cidade de Chicago, Estados Unidos, a partir de pequenas quantidades usadas em estruturas importantes que estavam sendo construídas. Nessa época, em uma ou duas colunas principais da edificação, utilizavam-se concreto experimental com a resistência à compressão de 10MPa a 15MPa maiores que o concreto até então utilizado. Assim, provava-se ser possível a utilização de concretos mais resistentes que o habitual, e a possibilidade da redução dos tamanhos dos pilares e aumento das áreas disponíveis. Durante dez anos essa resistência foi progredindo, até alcançar 45MPa a 60MPa, (AÏTCIN, 2000). Ao atingir 60MPa, uma barreira técnica foi encontrada: Reduzir as relações A/C e manter uma trabalhabilidade que permitisse a utilização do concreto, pois com os aditivos existentes na época isso não era possível.

Foi durante os anos 80 que as dosagens dos aditivos químicos utilizados foram aumentando aos poucos, até que se percebeu que poderiam ser usados como excelentes redutores de água, (CASTRO, 2007). Paralelamente, pesquisas sobre o uso da sílica ativa, um tipo de pozolana muito fina e reativa, foram desenvolvidas, possibilitando dessa forma a utilização do CAR (AÏTCIN, 2000).

Dessa maneira, segundo Torrico (2010), nos anos 80 e 90, com o advento dos superplastificantes e com a utilização regular da sílica ativa, os concretos chegaram a resistências de 100 MPa e, atualmente, os concretos podem ser empregados com resistências de até 150 MPa.

## 2.4 APLICAÇÕES

O uso do CAR tem apresentado crescente número de aplicações. O QUADRO 01 demonstra edifícios executados com CAR por diversos países, levantados em 1997, mostrando o início da sua utilização.

EDIFÍCIO	LOCAL	ANO	PAVIMENTOS	fck (MPa)
MASP	São Paulo	1963		45
Lake Point Tower	Chicago	1965	70	52
Water Tower Place	Chicago	1975	79	62
River Plaza	Chicago	1976	56	62
Columbia Center	Seattle	1983	76	66
Interfirst Plaza	Dallas	1983	72	69
311 South Wecker Drive Tower	Chicago	1989	79	83
Grand Arche de la Défense	Paris	1988		65
Two Union Square	Seattle	1989	58	115
Pacific First Center	Seattle	1989	44	115
Scotia Plaza Building	Toronto	1988		70
One Wecker Place	Chicago	1990	100	80
CNEC	São Paulo		18	60
225 W. Wacker Drive	Chicago	1989	31	96
Melbourne Central Tower	Melbourne	1990	55	80
Cond. Emp. Previnor	Salvador		18	60
Suarez Trade	Salvador	1993	31	60
First Republic Bank Plaza	Dallas	1986	72	69

QUADRO 01 – EDIFÍCIOS EXECUTADOS COM CAR  
FONTE: DAL MOLIN *et al.* (1997)

No Brasil, o uso do CAR está bastante expandido, sendo o país um de seus precursores, conforme pode ser observado no QUADRO 01. Uma das referências nacionais é o edifício E-Tower em São Paulo (FIGURA 02), com mais de 160 m de altura, projetado pelo Engenheiro e Professor Ricardo Leopoldo e Silva França, no qual foi empregado CAR, apresentando resistências maiores do que 100 MPa. Utilizaram-se aditivos superplastificantes para obter um abatimento de 140 a 200 mm com relação A/C de 0,19 e adições de sílica ativa e argila calcinada (HARTMAN e HELENE, 2004).





FIGURA 02: EDIFÍCIO E-TOWER, SÃO PAULO  
FONTE: HARTMAN E HELENE (2004)

Particularmente em Curitiba as duas estruturas que se destacam por apresentarem arquiteturas ousadas e que utilizaram CAR são o Museu Oscar Niemeyer, FIGURA 03 e o conjunto arquitetônico Evolution Towers, FIGURA 04, onde foi aplicado CAR com fck de 60 MPa em parte dos blocos das fundações e em alguns pilares (MOURA, 2010; NAKAMURA, 2006).



FIGURA 03 – MUSEU OSCAR NIEMEYER  
FONTE: MOURA (2010)



FIGURA 04: EVOLUTION TOWERS  
FONTE: NAKAMURA (2006)

## 2.5 VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA

O custo unitário do CAR, quando comparado ao concreto convencional, é bem superior, pelo alto consumo de cimento, a incorporação de aditivo superplastificante, a adição de sílica ativa, a necessidade do uso de agregados de alta qualidade e a maior complexidade do seu uso. Por outro lado, a resistência superior do CAR leva a reduções do consumo de concreto, do peso de aço, das solicitações nas fundações, nas áreas de formas e de custos de manutenção da estrutura, que pode compensar as diferenças de custos unitários, viabilizando o uso do CAR na construção civil (FREITAS, 2005).

Já em 1990 foi feito um dos primeiros estudos sobre a viabilidade econômica do CAR no Brasil. O estudo comparou o concreto convencional de 21MPa com o CAR de 60 MPa, a partir da estrutura de um edifício com 15 pavimentos em Porto Alegre, RS. O estudo comparou o custo da estrutura com concreto convencional e CAR em todas as peças estruturais e só nos pilares, considerando-se o concreto, as armaduras e as formas (inclusive a mão-de-obra e o uso do CAR). O estudo chega a uma economia de 12% no custo da estrutura com o uso de CAR em todas as peças

estruturais e uma economia de 11,5% com a aplicação de CAR somente nos pilares (DAL MOLIN et al. 1997).

Freitas (2005) também teve resultados satisfatórios na comparação do custo de construções com concreto convencional e CAR. O autor desenvolveu estudo comparativo da aplicação de CAR no caso do Evolution Towers. Os estudos foram feitos para os seis primeiros pavimentos do edifício Corporativo (área de 1.575 m<sup>2</sup> para cada um dos seis pavimentos, totalizando 9.450 m<sup>2</sup>), onde se aplicou concreto da classe C 60. Além da solução em C 60 executada, foram estudadas mais duas alternativas, uma em concreto convencional da classe C 40 e outra com CAR da classe C 80. O QUADRO 02 apresenta os resultados quanto aos quantitativos para cada alternativa. Com o estudo, o autor conclui que a aplicação de CAR pode vir a contribuir para a otimização dos custos e melhoria de qualidade de algumas das obras executadas na região metropolitana de Curitiba.

CONCRETO	CLASSE	VOLUME (m <sup>3</sup> )	FORMAS (m <sup>2</sup> )	AÇO (kg)	TAXA % por m <sup>2</sup>
Convencional	40	675	3.404	90.292	9,55
CAR	60	675	3.404	54.932	5,81
CAR	80	567	3.192	57.320	6,07

QUADRO 02: RESUMO DOS QUANTITATIVOS PARA CADA UMA DAS TRÊS ALTERNATIVAS  
FONTE: FREITAS (2005)

Além dos custos na produção do CAR, devem-se levar em conta os baixos custos de manutenção em seu ciclo de vida. As baixas relações A/A obtidas junto com o efeito do uso de adições reduz a permeabilidade dos concretos, o que resulta em aumento da durabilidade da estrutura (BIANCHINI, 2010).

## 2.6 MATERIAIS CONSTITUINTES

A seleção dos materiais e a otimização dos constituintes do CAR é complexa e a melhor forma de garantir a seleção adequada é por meio de ensaios prévios de laboratório (AİTCIN 2000).

De acordo com o ACI 363R-92 (2001), os materiais para a produção do CAR devem atender com maior atenção requisitos que favoreçam à trabalhabilidade e à resistência mecânica.

### 2.6.1 Cimento

A verificação das características do cimento para a produção do CAR é de extrema importância. Bianchini (2010) afirma que o CAR é muito mais sensível às alterações das características do cimento que os concretos usuais, dessa forma, os lotes de cimento usados para a produção de CAR devem possuir variações pouco significativas de suas características, para assegurar que os concretos produzidos apresentem as mesmas características dos concretos confeccionados em laboratório.

Como mencionado anteriormente, dependendo da resistência requerida, a produção do CAR requer alto consumo de cimento por metro cúbico de concreto para atingir o consumo de água necessário para se obter a consistência desejada (FREITAS, 2005). Esse fato pode levar a um alto calor de hidratação e à excessiva retração, levando ao surgimento de manifestações patológicas, como fissuras. O ACI 363R-92 (2001) recomenda a substituição de parte do cimento por adições suplementares, como a sílica ativa, para evitar tais problemas.

Segundo Neville (1997), outro problema do elevado consumo de cimento, considerado como teores maiores a  $530 \text{ kg/m}^3$ , é a perda da aderência entre pasta e agregado, levando à diminuição da resistência. Considerando isto, pode ser necessário substituir parte do cimento por aditivos minerais cimentícios, obtendo assim um novo material aglomerante.

O ACI 363R-92 (2001) limita para o silicato tri-cálcio presente não variar mais que 4%, a perda ao fogo deve ser inferior a 0,5% e a finura Blaine deve ser superior a  $375 \text{ cm}^2/\text{g}$ . A concentração de sulfato ( $\text{SO}_3$ ) deve variar  $\pm 0,2\%$ , para possibilitar a uniformidade adequada do cimento.

### 2.6.2 Agregado

Na produção de concretos convencionais é relativamente fácil obter agregados, mas quando se objetiva obter CAR, uma melhor seleção passa a ser relevante, pois a fase agregado pode ser o elo mais fraco do concreto, devido a melhora na resistência da pasta de cimento endurecida e na zona de transição (AÏTCIN, 2000; MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Além das características mencionadas, segundo Aïtcin, (2000), o controle de qualidade quanto à granulometria e ao diâmetro máximo no CAR são as características com maior relevância, visto que a necessidade fundamental é de que a demanda de água seja tão baixa quanto possível.

Para aumentar a resistência à compressão do CAR, recomenda-se a redução da dimensão máxima do agregado graúdo, devido ao seu efeito benéfico na zona de transição e diminuição da possibilidade de falhas e microfissuras nos grãos do agregado (BIANCHINI, 2010). O ACI 363R-92 (2001) afirma que o diâmetro máximo característico (DMC) do agregado graúdo deva ser fixado entre 9,5 e 12,7 mm, porém agregados com até 19,0 mm, (brita 1), têm sido aplicados com sucesso. Concretos com resistência à compressão de até 70 MPa podem ser confeccionados com agregados graúdos com dimensão máxima entre 20 mm e 25 mm. Para se alcançar uma resistência à compressão de aproximadamente 100 MPa a dimensão máxima dos agregados deve situar-se entre 14 e 20 mm. Já os concretos com resistências na ordem de 125 MPa têm sido produzidos com agregados com dimensão máxima entre 10 e 14 mm (MEHTA e MONTEIRO, 2008). Torrico (2010) destaca que os agregados menores são normalmente mais resistentes que os maiores, devido ao processo de britagem.

Mehta e Monteiro (2008) explicam que a utilização de agregados com dimensão máxima maior, tornam a zona de transição maior e mais heterogênea, conseqüentemente, mais suscetível à fissuração quando sujeitas às tensões de tração induzidas por movimentos diferenciais entre o agregado e a pasta.

Quando se trata de agregados miúdos, o mais adequado na produção do CAR é procurar uma proporção ótima de acordo com suas propriedades granulométricas, a fim de que a mistura seja a mais compacta possível (TORRICO, 2010).

### **2.6.3 Sílica ativa**

As adições minerais melhoram características técnicas dos CAR e são muito recomendadas, podendo ser incorporadas ao concreto ou como substituição de parte do cimento. Freitas (2005) lista benefícios ao concreto fresco e endurecido no uso de adições minerais no CAR, como, por exemplo:

- Aumento da coesão e diminuição da segregação e da exsudação;
- Aumento das resistências à compressão, tração e abrasão;
- Redução da retração e da porosidade, minimizando a permeabilidade e aumentando a durabilidade;
- Melhora na mitigação das reações álcali-agregado (dependendo da quantidade aplicada) e contra o ataque por sulfatos.

Entre as adições minerais, a sílica ativa é a mais empregada para a produção do CAR devido às suas características físico-químicas, que proporcionam alta reatividade com os produtos de hidratação do cimento Portland (MENDES, 2002).

A sílica ativa é um resíduo oriundo das indústrias de ferro silício produzidas em grandes fornos elétricos de fusão do tipo arco-voltaico, que operam a temperaturas acima de 2000°C. A redução do quartzo silício produz vapores de monóxido de silício gasoso (SiO), que se oxidam em contato com o ar e condensam na zona de baixa temperatura do forno (parte superior) em partículas esféricas minúsculas, compostas basicamente por dióxido de silício (SiO<sub>2</sub>), que são removidas através da filtragem dos gases expelidos por filtros manga (DAL MOLIN e OLIVEIRA, 1996). Pelas suas propriedades químicas (teor de SiO<sub>2</sub> > 85%) e físicas este material é considerado uma excelente pozolana que, quando usado no concreto, além de atuar quimicamente também atua de forma física, através do efeito microfíler. O emprego deste material melhora as condições de porosidade, e a aderência pasta/agregado; e, a sua reação com os produtos de hidratação do cimento resultam em compostos mais resistentes, diminuindo a lixiviação e aumentando a resistência à abrasão (DAL MOLIN e OLIVEIRA, 1996).

A sílica ativa reage com os íons de hidróxido de cálcio da solução alcalina que a envolve, formando como produto desta reação estruturas C-S-H semelhantes às resultantes da hidratação dos silicatos presentes no clínquer de cimento (ACI 363R-92, 2001). Assim, a sílica ativa colabora através da ação física e da ação química para o aumento da resistência do concreto. A primeira deve-se ao efeito microfiller causado pela grande finura do material, já mencionado, que produz melhor empacotamento dos sólidos, preenchendo os vazios entre os grãos de cimento (DAL MOLIN e OLIVEIRA 1996). A segunda deve-se à reação da sílica ativa com o hidróxido de cálcio, produzido pela reação do cimento, que gera silicato de cálcio

hidratado (C-S-H) adicional, bastante semelhante ao produzido pela reação do cimento (NEVILLE, 1997).

O efeito microflier resulta em maior empacotamento dos sólidos devido ao preenchimento dos vazios entre as partículas de cimento pelas minúsculas partículas esféricas de sílica ativa (FIGURA 05), cujo diâmetro médio é 100 vezes menor que o cimento (MENDES, 2002).

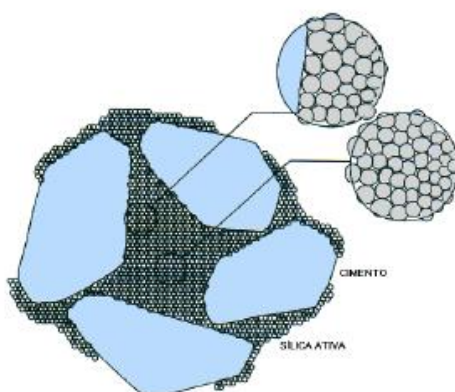


FIGURA 05: EFEITO MICROFILIER DA SÍLICA ATIVA NO CONCRETO  
FONTE: AİTCIN (2000)

Segundo Mehta e Monteiro (2008), obter concretos com resistências à compressão superiores a 50MPa aos 56 dias sem o uso de sílica ativa é muito difícil. Sem a adição dessa pozolana, os consumos de cimento são muito elevados, com inevitáveis problemas como excessivo calor de hidratação e grande retração.

De acordo com o ACI 363R-92 (2001), as dosagens de sílica ativa encontram-se normalmente entre 5 a 15% da massa de cimento. Valores acima disso levam a aumentos consideráveis no custo final do concreto e menor ganho de resistência. Neville (1997), afirma que são necessários teores maiores que 5% para permitir o fortalecimento da interfase agregado-pasta.

#### 2.6.4 Aditivo superplastificante

Revisitando os conceitos anteriormente discutidos, define-se como concreto durável o material com baixa porosidade, onde os grãos de cimento apresentam-se densamente empacotados antes do início da hidratação. Para garantir as

propriedades mecânicas superiores e maior durabilidade necessita-se baixa relação A/C, o que implicaria na redução da trabalhabilidade ou na utilização de um alto teor de cimento para a finalidade desejada. Os superplastificantes aparecem como aditivos atraentes, pois através da adição de pequenas quantidades desses aditivos poliméricos pode-se diminuir consideravelmente a quantidade de água necessária para a obtenção da trabalhabilidade desejada e, conseqüentemente, a porosidade, melhorando a durabilidade do concreto (CASTRO e PANDOLFELLI, 2009). Além disso, concretos confeccionados com superplastificante apresentam resistências à compressão maiores que concretos de referência sem adição de superplastificante. Com a maior velocidade de hidratação do cimento, as partículas deste são dispersas de maneira mais eficaz sob a ação dos superplastificantes (BIANCHINI, 2010).

Segundo De Larrard (1999), as finalidades da utilização de aditivos superplastificantes são:

- Reduzir o consumo de água para uma mesma consistência, aumentando assim a resistência e a durabilidade do concreto;
- Aumentar a fluidez da mistura sem alterar o consumo de água.
- Reduzir a quantidade de cimento da mistura, mantendo a consistência e a resistência à compressão com o objetivo de reduzir a retração, fluência e tensões térmicas.

Castro e Pandolfelli (2009) relatam que a utilização dos aditivos superplastificantes iniciou-se no final dos anos 80, simultaneamente no Japão e na Alemanha. Suas dosagens foram aumentadas pouco a pouco, até que se percebeu que eles poderiam ser usados como excelentes redutores de água. Com o avanço da tecnologia do concreto, o uso de aditivos químicos se tornou essencial para a produção de misturas de alto desempenho.

Segundo Erdogdu (2000), os aditivos superplastificantes melhoram as propriedades do concreto nas primeiras idades, sem promover qualquer efeito adverso para tempos mais longos, particularmente quando usado em misturas de concreto de alto desempenho. Sua finalidade é modificar as propriedades do concreto fresco e, assim, aumentar a resistência à compressão, controlar a velocidade de endurecimento, aumentar a trabalhabilidade e a durabilidade (ACI 363R-92, 2001).



A NBR 11768/11 define os aditivos superplastificantes como os produtos que aumentam o índice de consistência do concreto mantendo-se a quantidade de água de mistura constante, ou ainda, como aqueles que possibilitam a redução de pelo menos 12% da água de mistura na produção de um concreto com uma dada consistência. São polímeros orgânicos hidrossolúveis - com moléculas longas e de massa molecular elevada - obtidos sinteticamente por meio de um processo de polimerização complexo (CASTRO e PANDOLFELLI, 2009).

Na análise da compatibilidade entre o cimento e o superplastificante, parâmetros como a relação  $A/A$ , temperatura, finura do cimento, composição do cimento e eficiência da mistura afetam o resultado final de trabalhabilidade da pasta (AİTCIN, 2000).

ACI 363R-92 (2001) aponta problemas que poderiam ocorrer na aplicação de superplastificantes no CAR, naquela data, que não ocorrem nos concretos convencionais. São elas:

- Aumento da pressão do concreto sobre as formas devido a sua maior fluidez;
- Rápida perda de abatimento devido ao limitado tempo de eficiência de muitos tipos de aditivos, em especial em concretos sob temperatura elevada;
- Tempo curto para a aplicação do concreto, devido ao limitado período de eficiência do superplastificante pela perda de abatimento;
- Segregação dos componentes do concreto se a quantidade aplicada do aditivo for excessiva ou se este for inadequadamente misturado ao concreto.

A perda de abatimento pode ser solucionada por meio de dosagens repetidas de superplastificantes (MEHTA e MONTEIRO, 2008). Para AİTCIN (2000), não é possível saber, apenas com as especificações do cimento e do superplastificante, o tipo de comportamento reológico que se pode esperar dos traços com baixa relação  $A/A$ , sugerindo que sejam feitos ensaios preliminares com pastas de cimento e aditivo para determinação de combinações mais eficientes.

Essas limitações foram sendo tratadas com o desenvolvimento da tecnologia. Inicialmente foram usadas aditivos de primeira geração, os lignosulfonatos, utilizados como redutores de água normais e em alguns casos como superplastificantes (HARTMANN, 2002). O autor explica que esses tipos de aditivo são obtidos a partir do rejeito líquido do processo de extração da celulose da madeira. Segundo Mehta e Monteiro (2008), a função básica dos lignosulfonatos é a dispersão das partículas coloidais, camadas de moléculas de água dipolares circundam as partículas hidrófilas de cimento, dessa forma, evitando a sua floculação e obtendo um sistema com boa dispersão. Já os aditivos de segunda geração, o naftaleno sulfonato e a melamina sulfonato, são definidos como uma resina obtida por meio da polimerização do ácido naftalenossulfônico com formaldeído. Os mesmos causam repulsão eletrostática a partir do contato com a água (HARTMANN, 2002). O autor define os aditivos de terceira geração, os policarboxilatos, como estruturas químicas complexas que além de agirem por repulsão eletrostática atuam por repulsão estérica, que é produzida pela presença de uma longa cadeia lateral ligada em vários pontos na cadeia central do polímero, o impedimento do entrelaçamento das cadeias laterais de diferentes moléculas de aditivos cria uma capa de adsorção de grande volume, que impede a aproximação das partículas de cimento.

Bianchini (2010), afirma que, na produção do CAR, os principais aditivos empregados são os aditivos à base de policarboxilatos, conhecidos como de terceira geração ou hiperplastificantes. Estes mantêm a trabalhabilidade por um maior período de tempo em comparação aos aditivos superplastificantes de segunda geração e possuem maior capacidade de redução de água.

Como já mencionado, a compatibilidade entre o cimento e o aditivo é fundamental na produção de CAR. Para efeito histórico o ACI 363R-92 (2001), afirmava que a perda de abatimento em concretos que usam superplastificantes poderia ter origem no tipo do aditivo, na dosagem aplicada, na aplicação simultânea de aditivos diferentes, nas adições minerais, no tipo do cimento e na classe e temperatura do concreto. Assim, sugere-se que sejam feitos ensaios preliminares com pastas de cimento e aditivos para determinação de combinações mais eficientes. Os dois métodos mais usados para a análise de pastas são o método do funil de Marsh (NBR 7681, 2013) e ensaio de miniabatimento de Kantro (KANTRO, 1980 *apud* AİTCIN, 2000).

Em 2005, Freitas ressaltava a importância desses estudos de compatibilidade para os CAR por dois fatores. O primeiro era o custo destes aditivos, cinco a dez vezes superior ao dos plastificantes simples, assim, sua otimização reduziria de forma significativa o custo do metro cúbico do concreto. O segundo devido a problemas técnicos que o excesso de aditivo poderia vir a causar, como a segregação, o excesso de incorporação de ar e o retardo de pega.

### **2.6.5 Água de amassamento**

A água de amassamento deve ser potável e com origem em redes de abastecimento público. Segundo o ACI 363 R-92 (2001), se for necessária a utilização de água de origem desconhecida recomenda-se testes comparativos entre o concreto produzido com a água de qualidade desconhecida e o produzido com água potável.

A NBR 15900: 2009 impõe que a água utilizada na mistura do concreto e argamassa não deve conter substâncias que alterem propriedades químicas e físicas do concreto, como hidratação do cimento, resistência, alteração na pega ou coloração. A mesma norma não difere a água utilizada para amassamento de concretos convencionais da utilizada no CAR.

## **2.7 PROPRIEDADES DO CAR NO ESTADO FRESCO**

As propriedades reológicas do CAR no estado fresco podem ser determinadas em qualquer momento durante o período de indução da hidratação do cimento e são importantes principalmente no período em que o material é lançado nas formas (CASTRO; LIBORIO; PANDOLFELLI, 2011).

Segundo Mehta e Monteiro (2008), trabalhabilidade é a propriedade composta de pelo menos dois componentes principais: fluidez, que descreve a facilidade de mobilidade do concreto fresco; e a coesão, que descreve a resistência à exsudação ou à segregação. A consistência é um dos principais fatores que interferem na trabalhabilidade do concreto fresco.

Freitas (2005) relata que vazios ou preenchimento com material segregado são tanto mais difíceis de corrigir quanto mais alta for a resistência do concreto utilizado.

Dessa forma, a trabalhabilidade e a consistência adequada são mais significativas para o CAR do que para um concreto convencional. Geralmente, o CAR obtém abatimentos muito altos, devido as maiores coesões na região de interfase pasta-agregado.

Como já mencionado, devido às baixas relações  $A/A$  e ao alto consumo de superplastificantes, as perdas na trabalhabilidade podem ser bem mais rápidas no CAR, para determinados tipos de aditivos, do que nos concretos convencionais (FREITAS, 2005).

A fim de aumentar a trabalhabilidade do CAR no estado fresco, sugere-se o uso de aditivos incorporadores de ar. Mehta e Monteiro (2008) afirmam que a aplicação de aditivos incorporadores de ar no concreto torna possível inserir percentuais de até 5% de ar. Em CAR, para efeito de comparação, com a relação  $A/A$  abaixo de 0,30 obtêm-se, normalmente, teores de ar aprisionado por volta de 2% (AİTCIN, 2000).

## 2.8 PROPRIEDADES DO CAR NO ESTADO ENDURECIDO

As propriedades do CAR no estado endurecido são diferentes dos concretos convencionais, devido as maiores coesões na região da interfase pasta-agregado, menor porosidade da pasta endurecida, a maior influência da rigidez do agregado gráúdo, entre outras. É importante mencionar que o CAR tem um comportamento frágil tanto na tração como na compressão (TORRICO, 2010).

As propriedades do CAR no estado endurecido mais relevantes são a resistência à compressão, à tração por compressão diametral, o módulo de elasticidade, a retração e a fluência.

### 2.8.1 Resistência à compressão

A resistência à compressão aumenta de forma inversamente proporcional à relação  $A/A$ , porém, no CAR esta lei é válida até ser atingida a resistência de ruptura do agregado gráúdo. Nesse caso, quando esse material não é resistente o suficiente, em comparação à resistência da pasta de cimento hidratado, torna-se o elo fraco da estrutura (AİTCIN, 2000).

Para a avaliação da resistência à compressão, os corpos de prova (CP) são submetidos a ensaios de ruptura sob carga axial (NBR 5739: 2007). A mesma norma destaca a importância do processo de preparação dos topos dos corpos de prova cilíndricos para o ensaio de compressão axial. A norma indica três procedimentos para este fim: o arremate com pasta de cimento, o capeamento e a retificação. Outros procedimentos podem ser adotados, desde que os resultados sejam submetidos à avaliação prévia por comparação estatística e compatíveis com os obtidos com corpos de prova capeados pelo processo tradicional. As técnicas de tratamento superficial podem ser classificadas em três categorias: Sistemas aderentes (argamassas de enxofre ou argamassas de cimento), sistemas não aderentes (pratos metálicos com revestimento elastomérico confinado ou placas de madeira) e sistemas com desgaste mecânico (utilização de diferentes retíficas ou serras circulares). O uso de tratamento com argamassa de enxofre para corpos de prova cilíndricos leva a bons resultados se os concretos tiverem resistência de até cerca de 70 MPa, para resistências maiores, o sistema mais indicado é o desgaste mecânico das faces do corpo de prova (CHIES; ROHDE; SILVA FILHO, 2014). A partir de ensaios em laboratório com concretos com resistência à compressão de 20 a 120 Mpa, os autores elegeram a técnica de preparação mais adequada para concretos de alta resistência através da análise da resistência média, do desvio padrão e do coeficiente de variação. Segundo os autores para o CAR, constata-se que os tratamentos com sistemas não aderidos com almofada de neoprene confinada com dureza shor 60 e 70 e os sistemas de desgaste mecânico com retífica apresentaram-se os mais eficientes.

O procedimento de cura, responsável por manter a água necessária à hidratação do cimento durante o endurecimento do concreto, é de extrema importância para o CAR, pois uma perda muito rápida desta água, que já é pouca devido à baixa relação A/A, pode afetar a resistência mecânica e causar grande retração (AİTCIN, 2000; ACI 363 R-92, 2001).

As partículas não hidratadas de cimento continuam a formar produtos de hidratação com a idade, assim, de forma geral, a resistência do concreto aumenta com a idade (AİTCIN, 2000; NEVILLE, 1997). A NBR 6118:2014 impõe que a evolução da resistência à compressão com a idade deve ser obtida por ensaios especialmente executados para tal.

Mendes (2002), concluiu com sua pesquisa que é possível produzir CAD com os materiais locais de Curitiba, da maneira que os mesmos são fornecidos, sem a necessidade de promover alterações em suas características iniciais e obtendo a resistência à compressão dentro da faixa esperada. O autor obteve a maior resistência com o agregado graúdo proveniente do granito. Freitas (2005) também obteve resultados satisfatórios para a resistência à compressão. O autor concluiu que a aplicação de CAR pode vir a contribuir para a otimização dos custos e melhoria de qualidade de algumas das obras executadas na região metropolitana de Curitiba.

### **2.8.2 Resistência à tração por compressão diametral**

Segundo Mendes (2002), similarmente a resistência à compressão, a resistência à tração é uma propriedade importante para as estruturas de concreto, serve como parâmetro para a verificação da aderência entre o concreto e a armadura, estabelecimento de critérios nos estados últimos de utilização e de serviço, estimativa de carga que inicia a formação de fissuras no concreto e previsão de vida útil da estrutura. A NBR 6118:2014, recomenda-se que a resistência à tração seja determinada experimentalmente, através de ensaios de resistência à tração direta, na flexão e por compressão diametral, sendo que no presente trabalho será abordado apenas o último.

O presente trabalho optou pelo ensaio de tração por compressão diametral por ser possível executar com o mesmo tipo de corpo-de-prova do ensaio de compressão e por apresentar resultados mais uniformes que os obtidos com ensaio de tração direta (NEVILLE, 1997).

Segundo a norma supracitada, NBR 6118:2014, na falta de ensaios para obtenção da resistência à tração na flexão, pode ser avaliado o seu valor médio ou característico por meio das seguintes equações:

$$f_{ctk,inf} = 0,7 f_{ct,m}$$

$$f_{ctk,sup} = 1,3 f_{ct,m}$$

Para concretos de classes até C50:

$$f_{ct,m} = 0,3 f_{ck}^{2/3}$$

Para concretos de classes C55 até C90:

$$f_{ct,m} = 2,12 \ln (1 + 0,11 f_{ck})$$

Onde:  $f_{ct,m}$  e  $f_{ck}$  são expressos em megapascal (MPa).

### 2.8.3 Módulo de elasticidade

O concreto é um material composto de duas fases distintas: agregado e pasta, que apresentam módulos de elasticidade individuais e diferentes. No CAR, pelo fato das pastas possuírem poucos vazios, a diferença do comportamento elástico das fases é pequena, fato que contribui para uma menor tendência à microfissuração do material (FREITAS, 2005). Já nos concretos convencionais, a proporção do traço influencia o valor do módulo, porque os agregados representam a maior parte do volume da mistura, de maneira que o módulo destes é o mais significativo na sua composição.

O conhecimento do módulo de elasticidade do CAR é essencial por ser uma propriedade que influi diretamente nas deformações dos elementos estruturais. Normalmente é calculada por intermédio da resistência à compressão, desde que exista uma relação proporcional entre essas propriedades, já que os parâmetros que influem são os mesmos, embora em graus distintos. Depois da relação A/A o principal parâmetro que define a elasticidade é a resistência do agregado graúdo, pois esta pode diminuir ou aumentar o módulo de elasticidade para uma mesma resistência à compressão do concreto (ISAIA; HELENE; TUTIKIAN, 2011).

A NBR 6118:2014 cita que o módulo de elasticidade pode ser estimado usando as expressões a seguir:

$$E_{ci} = \alpha E \cdot 5600 f_{ck}, \text{ para } f_{ck} \text{ de } 20 \text{ MPa a } 50 \text{ MPa};$$

$$E_{ci} = 21,5 \cdot 10^3 \cdot \alpha E \cdot \left( \frac{f_{ck}}{10} + 1,25 \right)^{1/3}, \text{ para } f_{ck} \text{ de } 55 \text{ MPa a } 90 \text{ MPa}.$$

Sendo:

- $\alpha E = 1,2$  para basalto e diabásio;
- $\alpha E = 1,0$  para granito e gnaiss;
- $\alpha E = 0,9$  para calcário;

- $\alpha E = 0,7$  para arenito,

Onde

- $E_{ci}$  e  $f_{ck}$  são dados em megapascal (MPa).

Entretanto, Freitas (2005) enfatiza que a estimativa do módulo que são válidas para concretos convencionais apresentam problemas quando a resistência à compressão aumenta. As pesquisas indicam valores para o módulo de elasticidade de CAR da ordem de 31 a 45 GPa, dependendo do método para determinação (ACI 363 R-92, 2001).

#### **2.8.4 Retração e fluência**

Fluência é o fenômeno onde ocorre o aumento gradual da deformação de um elemento de concreto quando este é submetido a um estado de tensões constante ao longo do tempo (METHA e MONTEIRO, 2008).

Freitas (2005) explica que os fenômenos de retração e de fluência levam o concreto a ter deformações com a passagem do tempo, previstas com valores aproximados. O concreto exibe deformações elásticas somente sobre carregamentos de curta duração, e em intensidades relativamente baixas e, devido às deformações adicionais decorrentes da retração e fluência desenvolvidas lentamente, o comportamento do concreto é não-elástico e dependente do tempo.

Os CAR têm retração semelhante a um concreto convencional, mas o uso de superplastificantes possibilita minimizar a quantidade de água e, conseqüentemente, a retração (ACI 363R-92, 2001). A quantidade de retração é proporcional ao volume de água utilizado no concreto.

A fluência em concretos que utilizam aditivos superplastificantes é bastante reduzida, sendo muito menor nos CAR do que nos concretos convencionais, considerando-se ambos sob a mesma tensão e com a mesma idade (ACI 209R-92, 2001).



## 2.9 MICROESTRUTURA DO CAR

A microestrutura dos concretos é composta pela fase pasta de cimento, a fase agregado e a zona de transição, que é a região situada entre a fase pasta de cimento e a fase agregado, conforme FIGURA 06. Sendo para o CAR, definidas a seguir.

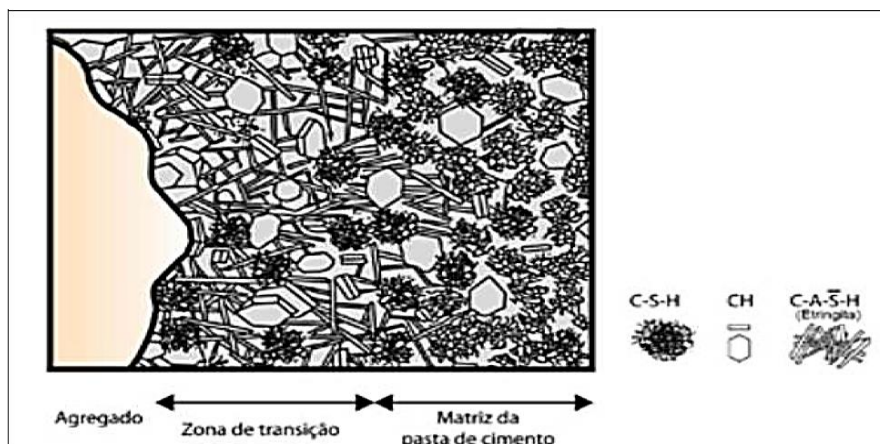


FIGURA 06: MICROESTRUTURA DO CONCRETO  
 FONTE: METHA E MONTEIRO (2008)

### 2.9.1 Pasta de cimento

A pasta de cimento é composta de cimento e água. Segundo Aïtcin, (2000), a resistência dessa fase pode ser melhorada de três formas: reduzindo a porosidade, diminuindo o tamanho dos grãos dos produtos de hidratação ou reduzindo heterogeneidades.

Reduzindo-se a relação A/A as partículas de cimento ficam mais próximas, reduzindo-se a porosidade capilar e disponibilizando menos espaço para crescimento dos produtos externos. Estes produtos compreendem os produtos iniciais de hidratação, formados quando existem muita água e espaços vazios que geram considerável volume de vazios (AÏTCIN, 2000; MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Aïtcin (2000) explica que a redução da relação A/A resulta na formação de cristais de C-S-H com textura fina e altamente compactos. Também se observa a redução da quantidade de plaquetas hexagonais de C-H, de longas agulhas de etringita e longos filamentos pilosos de C-S-H. Dessa forma, diminuindo o tamanho dos grãos dos produtos de hidratação.

Bianchini (2010) afirma que as bolhas de ar e a tendência natural das partículas de cimento flocularem de modo folgado definem a heterogeneidade na pasta de cimento. Cabe aos superplastificantes, utilizados nos CAR, o papel na redução do ar aprisionado no concreto e a melhor dispersão das partículas de cimento nas pastas recém-misturadas (AÏTCIN, 2000).

### **2.9.2 Fase agregados**

A fase agregados influencia na resistência do CAR pelas características da brita. Sugere-se empregar partículas individuais com a menor concentração possível de elementos fracos. Devem-se evitar rochas com planos de clivagem fracos ou expostas às intempéries. A rocha a ser britada deve ser resistente para que os grãos possuam a menor quantidade possível de microfissuras. O uso de agregado graúdo de menores dimensões favorece a obtenção de grãos com menor quantidade de microfissuras e a redução do processo de exsudação interna, conforme detalhado anteriormente (BIANCHINI, 2010).

### **2.9.3 Zona de transição**

Em concretos convencionais, a zona de transição (ZT) caracteriza-se por uma região mais porosa se comparada com a com pasta de cimento hidratada situada em regiões mais distantes do agregado graúdo. Trata-se de uma camada delgada que envolve o agregado e que por ser menos resistente do que as outras fases do concreto, influencia consideravelmente no comportamento mecânico e na sua durabilidade (METHA e MONTEIRO, 2008). A principal causa é o fato que as partículas de cimento não se arranjam densamente junto às partículas relativamente grandes do agregado graúdo, ocorrendo efeito parede. O qual ocorre quando for inserida uma partícula maior nas partículas menores dominantes. A parede do agregado graúdo impedirá que as partículas menores se aproximem nesta área, dessa forma reduzindo a quantidade em um determinado volume (LARRARD, 1999). Outro causador é o fenômeno da exsudação interna que eleva a relação A/A na região da interface pasta/ agregado (NEVILLE, 1997). É em função da presença da

ZT que o concreto convencional rompe a um nível de tensão consideravelmente mais baixo do que a resistência dos dois constituintes principais (agregado e pasta).

Para diminuir esses efeitos, aconselha-se a redução da relação A/C e a incorporação de partículas com granulometria mais fina que o cimento, como a sílica ativa (SILVA, 2000). No CAR, Da Silva (2006), afirma que a microestrutura densa, homogênea e pouco cristalina da zona de transição é a maior diferença, sob o ponto de vista microscópio, quando comparados aos concretos convencionais. Além disso, o uso de superplastificantes forma, na zona de transição, uma fina camada rica em hidróxido de cálcio nas primeiras idades. Após a hidratação, a pasta torna-se completamente densa, não sendo encontrados etringita ou espaços vazios (ALMEIDA, 2005).

## 2.10 MÉTODOS DE DOSAGEM DO CAR

Cada vez mais o concreto envolve mais que uma mistura de cimento, água e agregados e é mais difícil definir teoricamente suas propriedades, mesmo hoje com o uso de computadores e avanços cada vez mais frequentes na informática (AİTCIN, 2000).

Bianchini (2010), lista vários métodos para a dosagem de concretos de alta resistência desenvolvidos nos últimos anos, alguns baseados em cálculos computacionais e uma gama cada vez maior de propriedades dos concretos e seus materiais. Os mais conhecidos são:

- Mehta e Aİtcin (MEHTA & AİTCIN, 1990, *apud* BIANCHINI, 2010).
- De Larrard (DE LARRARD, 1990, *apud* BIANCHINI, 2010);
- Domone e Soutsos (DAMONE & SOUTSOS, 1994, *apud* BIANCHINI, 2010);
- Nawy, (NAWY, 1996, *apud* BIANCHINI, 2010);
- Torrales-Carbonari, (TORALLES-CARBONARI, 1996, *apud* BIANCHINI, 2010);
- O'Reilly Diaz (O'REILLY DIAZ, 1998, *apud* BIANCHINI, 2010).
- Aİtcin, (AİTCIN, 2000);
- IPT/EPUSP Modificado (CREMONINI *et al.*, 2001, *apud* BIANCHINI, 2010);
- Brahatkumar *et al.* (BRAHATKUMAR *et al.*, 2001, *apud* BIANCHINI, 2010);

- De Larrad e Sedran (DE LARRARD e SEDRAN, 2002, *apud* BIANCHINI, 2010);
- DMDA (CHANG, 2003, *apud* BIANCHINI, 2010).

Alves (2001) e Freitas (2005) realizaram estudos comparativos de métodos de dosagem para CAR. Os autores estudaram os métodos de dosagem Mehta e Aïtcin (1990), IPT/EPUSP Modificado (2001) e Aïtcin (2000) sendo que Alves (2000) utilizou em seu estudo ainda o método Torrales Carbonari (1996).

No estudo feito por Freitas (2005) os menores custos de matéria prima foram obtidos pelo método Mehta e Aïtcin (1990), já Alves (2000) encontrou custos inferiores nos concretos com resistência entre 57 e 72 MPa quando dosados pelo método Mehta e Aïtcin (1990), e nos concretos com resistência acima desta faixa obteve-se os custos de produção mais baixos com os concretos dosados com o método Aïtcin (2000). Segundo Bianchini (2010), essa diferença ocorreu pelo fato de Alves (2000) ter empregado em sua pesquisa aditivos à base de naftaleno de segunda geração, enquanto e Freitas (2005) aditivos à base de policarboxilato de terceira geração.

Freitas (2005) enfatizou que o método Aïtcin (2000) minimiza o consumo de cimento dos traços, já o método Mehta e Aïtcin (1990) otimiza o consumo de superplastificante, item este que representava significativa parcela do custo de matéria prima dos concretos de alta resistência, na época do estudo. Pelos estudos feitos com agregados da região metropolitana de Curitiba, os métodos Mehta e Aïtcin (1990) e Aïtcin (2000) se mostraram mais adequados e serão descritos na sequência (MENDES, 2002; FREITAS, 2005).

### **2.10.1 Método Mehta e Aïtcin**

O método Mehta e Aïtcin (1990) é utilizado para concretos com resistência à compressão dentro do intervalo de 60 a 120 MPa. O método é empregado para o uso em concretos dosados com agregados graúdos com diâmetro máximo entre 10 mm e 25 mm, e abatimento entre 200 mm e 250 mm e assume que os agregados utilizados não limitam a resistência do concreto.

As etapas do método são listas a seguir, conforme Freitas (2005):

- Divide-se a provável resistência em 5 níveis, 65, 75, 90, 105 e 120 MPa, identificados pelas letras A até E, para a idade de 28 dias;
- Estimam-se os máximos consumos de água entre 120 e 160 l/m<sup>3</sup>, valores baseados pela experiência com concretos de alto abatimento que usam superplastificantes;
- Pressupõe-se o volume total da pasta em 0,35 m<sup>3</sup> para determinar a fração do volume dos componentes da pasta de cimento;
- Subtrai-se a água da pasta e o 0,02 m<sup>3</sup> de ar incorporado (2% do volume de concreto) em uma análise volumétrica, dos 35% de volume ocupado pela pasta. Em seguida, determinam-se as quantidades de aglomerante, cimento mais sílica ativa, (conhecendo as massas específicas de ambos);
- O volume total de agregado é 0,65m<sup>3</sup> por metro cúbico de concreto. A relação miúdos/graúdos varia de acordo com o decréscimo no consumo de água e o aumento de consumo do superplastificante e é definida conforme a resistência, QUADRO 03;

Nível de resistência	Relação volumétrica dos agregados miúdos: graúdos
A1	2,05 : 2,95
A	2,00 : 3,00
B	1,95: 3,05
C	1,90 : 3,10
D	1,85: 3,15
E	1,80: 3,20

QUADRO 03: RELAÇÃO ENTRE OS AGREGADOS MIÚDOS E GRAÚDOS CONFORME A RESISTÊNCIA

FONTE: MEHTA E AİTCIN (1990), *apud* FREITAS, 2005

- O método recomenda a dosagem preliminar de superplastificante de 1% de sólidos sobre a massa de cimento. Da mesma forma, para cada dosagem o peso da fração de água contida no aditivo foi subtraído dos consumos máximos de água;
- Corrige-se a umidade dos agregados miúdos e graúdos subtraindo-se o volume de água contida nestes dos consumos máximos de água.

Caso o abatimento estabelecido de no mínimo  $(150 \pm 20)$  mm, não tenha sido alcançado depois de realizada a dosagem, aumenta-se gradualmente o consumo do aditivo superplastificante, até o limite em que se perde a coesão do concreto. Caso o concreto apresente alguma segregação, deve-se aumentar a relação entre os agregados miúdos e graúdos para usar mais material fino.

### 2.10.2 Método Aïtcin

O método baseia-se na norma ACI 211-1 (1991) *Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavy-weight and Mass Concrete* e leva em conta cinco características diferentes: relação A/A; teor de água; dosagem de superplastificante; teor de agregado graúdo e teor de ar incorporado (FREITAS, 2005). O fluxograma do método está apresentado na FIGURA 07.

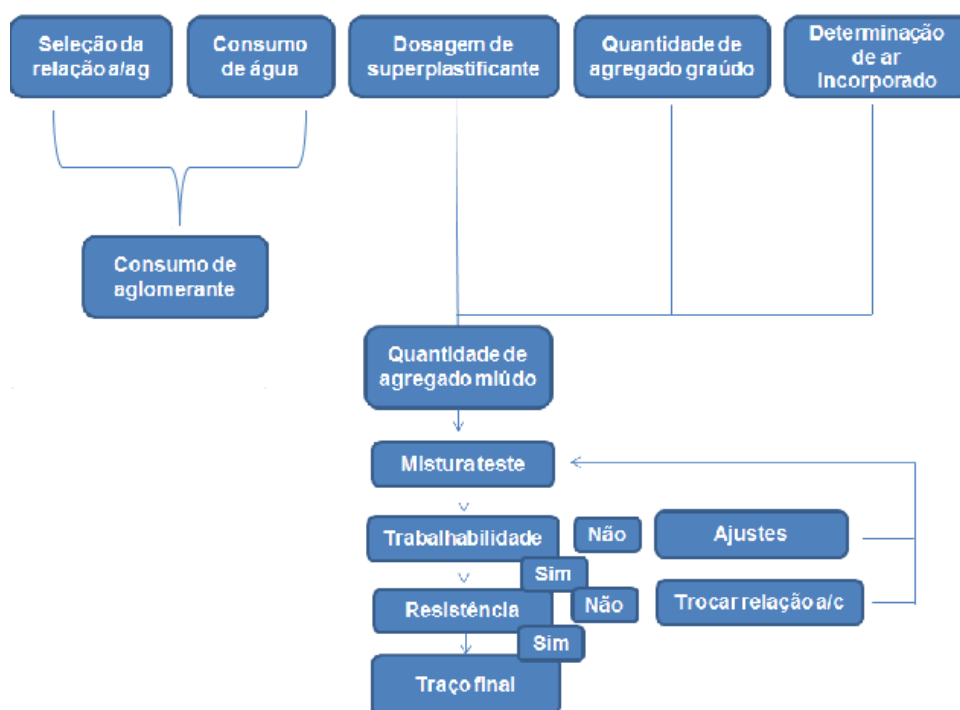


FIGURA 07: FLUXOGRAMA DO MÉTODO DE AÏTCIN  
FONTE: ADAPTADO DE AÏTCIN (2000)

O primeiro passo é determinar a relação A/A necessária para alcançar a resistência à compressão especificada. O autor fornece uma curva teórica para estimar a relação A/A, mostrada na FIGURA 08. A curva baseia-se em uma série de resultados obtidos em pesquisas.

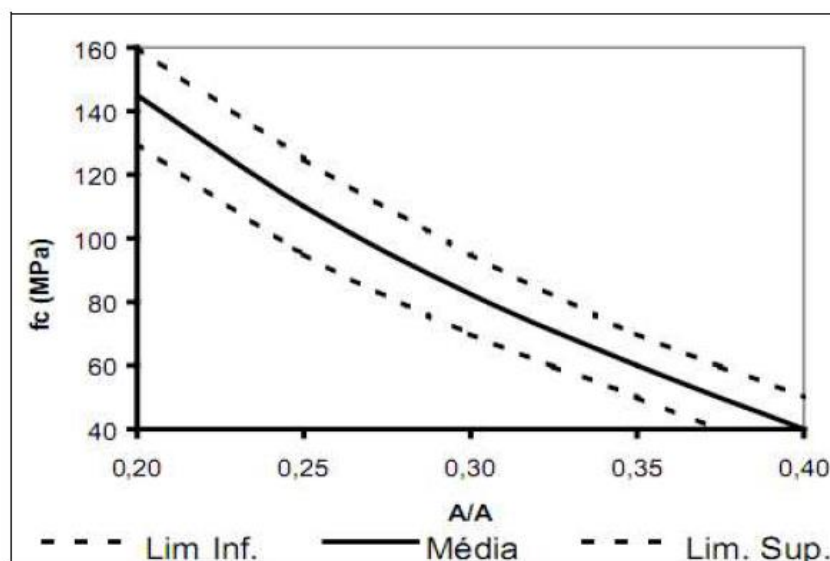


FIGURA 08: RELAÇÃO A/A X RESISTÊNCIA AOS 28 DIAS MÉTODO AÏTCIN  
 FONTE: AÏTCIN (2000)

O segundo passo é determinar o teor de saturação do aditivo, que significa que o incremento da dosagem de superplastificante não provoca melhora significativa na fluidez da pasta. Deve-se iniciar com 1% em uma mistura experimental e realizar os ajustes se o resultado não for satisfatório.

Em seguida, determina-se o teor de água, definido simplificadaamente pelo ponto de saturação do aditivo. O ábaco baseia-se em diversos ensaios em laboratório, conforme FIGURA 09.

Ponto de saturação	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	porcentual de sólidos
Dosagem de água	120 a 125	125 a 135	135 a 145	145 a 155	155 a 165	litros/m3

FIGURA 09: ÁBACO PARA DETERMINAÇÃO DA QUANTIDADE DE ÁGUA MÉTODO AÏTCIN  
 FONTE: AÏTCIN (2000)

O último passo é a determinação do teor de agregado gráudo, com base na forma do mesmo, conforme FIGURA 10.

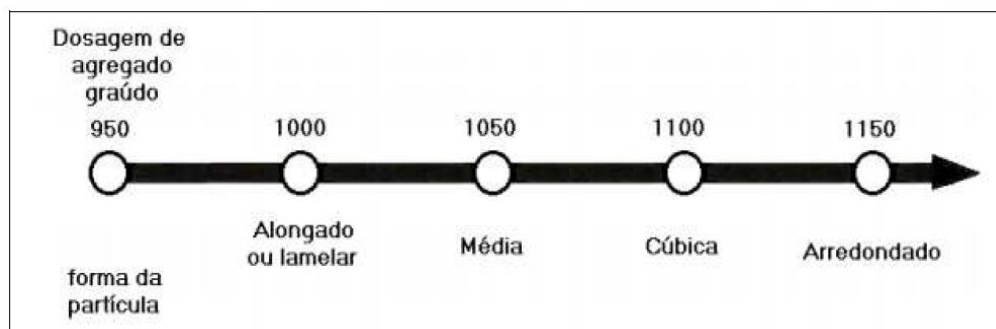


FIGURA 10: ÁBACO PARA DETERMINAÇÃO DA QUANTIDADE DE AGREGADO GRAÚDO  
MÉTODO AÏTCIN  
FONTE: AÏTCIN (2000)

Com todos os materiais calculados, subtrai-se de  $1\text{m}^3$  da soma de todos, em volume, para encontrar a quantidade de agregado miúdo. Experimentalmente verifica-se a trabalhabilidade do concreto, caso não seja satisfatória, devem ser feitos ajustes no teor de aditivo e de água. A partir do rompimento dos corpos-de-prova analisam-se as propriedades obtidas, se forem satisfatórias, tem-se o traço, caso contrário regride-se para a etapa de ajustes.



### **3 EFEITO DO PÓ DE PEDRA NO CONCRETO**

De acordo com alguns investigadores, a forma mais eficiente para a indústria da construção se tornar uma atividade sustentável passa pela incorporação de resíduos de outras indústrias em materiais de construção. Sendo o cimento Portland e o concreto os materiais mais utilizados na indústria da construção, a nível mundial, com tendência para aumentar nos próximos anos, existe já um corpo de investigação bastante consistente em termos da utilização de resíduos em concretos e da incorporação de resíduos como agregados (JALALI e TORGAL, 2008).

Segundo Klein (2008), engenheiros e construtores buscam alternativas à utilização da areia natural, quer seja pela dificuldade na obtenção da mesma, quer pelo elevado custo apresentado por este material. Nesse contexto, a autora aponta que devido às vantagens económicas e ambientais e pela facilidade de encontrar a areia artificial em pedreiras próximas aos grandes centros urbanos, a substituição da areia natural pela de britagem vem sendo realizada.

Dentro deste contexto, esse capítulo busca fazer a revisão de conceitos teóricos relativos ao efeito da aplicação de finos no concreto, em especial do pó de pedra.

#### **3.1 AGREGADOS**

##### **3.1.1 Generalidades**

O produto básico da indústria da construção civil é o concreto à base de cimento Portland. Em média, por metro cúbico de concreto, 42% são compostos de agregado graúdo (brita), 40% de areia, 10% de cimento, 7% de água e 1% de aditivos químicos. Assim, no mínimo cerca de 70% do concreto são constituídos por agregados, decorrendo a importância do uso de agregados com especificações técnicas adequadas (MENOSE, 2004).

Do ponto de vista tecnológico, Mehta e Monteiro (2008) e Neville (1997), apontam que as características dos agregados graúdos e miúdos afetam a qualidade e desempenho do concreto, principalmente quanto à estabilidade dimensional, resistência, durabilidade e trabalhabilidade. Muitas destas características dependem inteiramente das propriedades da rocha matriz. Por outro

lado, algumas características dependem do tipo de britagem empregado, como: forma e textura superficial das partículas, absorção, tamanho e composição granulométrica do agregado.

A NBR 9935 (2011) define a terminologia dos agregados, os termos relativos a agregados mais comumente empregados em concreto e argamassa de cimento. Assim, os agregados podem ser classificados quanto a natureza, como:

- Agregado: material granular, geralmente inerte com dimensões e propriedades adequadas para a preparação de argamassa e concreto;
- Agregado natural: material pétreo que pode ser utilizado tal como é encontrado na natureza, podendo ser submetido à lavagem, classificação ou britagem;
- Agregado miúdo de britagem: todo material com grãos passantes na malha de 4,75 mm obtido por processo de britagem. Assim, tanto o pó de pedra quanto a areia industrial de britagem (areia artificial) pertence a esta classificação;
- Agregado reciclado: material obtido de rejeitos, subprodutos da produção industrial, mineração, processo de construção ou demolição da construção civil, incluindo agregados recuperados de concreto fresco por lavagem;
- Agregado especial: agregado cujas propriedades podem conferir ao concreto ou argamassa um desempenho que permita ou auxilia no atendimento de solicitações específicas em estruturas não usuais.

Os finos possuem diversas denominações nos meios técnicos e comerciais devido à falta de norma técnica que apresente especificações gerais. A nomenclatura mais utilizada é ainda pó de pedra (MENOSE, 2004).

Para o presente trabalho, agregado miúdo de britagem é considerado todo material resultante da cominuição de rochas passante na peneira 4,75 mm. Dentro desta classificação, areia artificial é o material passante na peneira de malha de 4,75 mm e o pó de pedra por apresentar material de granulometria com percentual abaixo de 0,075 mm, em suspensão na água.

Os agregados podem ser obtidos de diversas rochas matrizes. Como exemplo, o QUADRO 04 apresenta a classificação mineralógica das principais rochas destinadas à produção de agregados para concreto, classificadas por Neville (1997).

<b>Grupo BASALTO</b>	<b>Grupo GRANITO</b>	<b>Grupo GABRO</b>
Andesito	Gnaisse	Diorito básico
Basalto	Granito	Gnaise básico
Porfíritos básicos	Granodiorito	Gabro
Diabásio	Pegmatito	Horneblenda
Epidiorito	Quartzo-dolerito	Norit
Lamprófiro	Sienito	Peridotito
Quartzo-dolerito		Picrito
Espilito		Serpentinito
<b>Grupo das ROCHAS PORFIRÍTICAS</b>	<b>Grupo ARENITO Incluindo Rochas Vulcânicas</b>	<b>Grupo QUARTZITO</b>
Aplito	Arcósio	Rochas sedimentares
Dacito	Grauvaca	Arenitos quartzíticos
Felsito	Arenitor	Quartzito recristalizado
Granófiro	Tufos	
Lavas porfíricas	Silito	
Microgranito	<b>Grupo CALCÁRIO</b>	<b>Grupo XISTO</b>
Rochas hipo-abissais	Dolomito	Filito
Quartzo-porfíricos	Calcário	Xisto
Riólito	Mármore	Folheto
Traquito		Rochas cisalhadas
<b>Grupo SÍLICA</b>	<b>Grupo HORNFELS</b>	
Calcedônia	Rochas de contato alteradas, exceto mármore	
Sílex		

QUADRO 04: CLASSIFICAÇÃO MINERALÓGICA DE ROCHAS DESTINADAS A PRODUÇÃO DE AGREGADOS  
 FONTE: NEVILLE (1997)

Weidmann (2008) define a composição granulométrica como a distribuição do tamanho de partículas de determinado agregado, usualmente expressa em termos de porcentagens acumuladas das frações retidas ou passantes em uma dada série de aberturas de peneira. As aberturas nominais são apresentadas no QUADRO 05, conforme definidas pela NBR 7122:2009.

SÉRIE NORMAL	SÉRIE INTERMEDIÁRIA
75 mm	-
-	63 mm
-	50 mm
37,5 mm	-
-	31,5 mm
-	25 mm
19 mm	-
-	12,5 mm
-	-
9,5 mm	6,3 mm
-	-
4,75 mm	-
2,36 mm	-
1,18 mm	-
600 µm	-
300 µm	-
150 µm	-

QUADRO 05: PENEIRAS DA SÉRIE NORMAL E INTERMEDIÁRIA E RESPECTIVAS ABERTURAS NOMINAIS  
 FONTE: NBR 7211:2009

As peneiras da série normal são utilizadas nos ensaios para fins de classificação granulométrica e determinação do módulo de finura e as peneiras da série intermediária utilizadas no ensaio de peneiramento de agregados para auxiliar na avaliação da granulometria e principalmente na classificação do mesmo quanto à dimensão máxima característica (WEIDMANN, 2008). De acordo com NBR 7211:2009 são definidos:

- Módulo de finura: Soma das porcentagens retidas acumuladas, relativas à massa de um agregado, nas peneiras da série normal, dividida por 100;
- Dimensão máxima característica: Corresponde à abertura nominal, em milímetros, da malha da peneira da série normal ou intermediária na qual o agregado apresenta uma porcentagem retida acumulada igual ou imediatamente inferior a 5% em massa.

Como destacado anteriormente, no CAR, a resistência da pasta de cimento endurecida e da zona de transição são melhoradas, não sendo mais limitadoras da resistência do concreto. Assim, o agregado graúdo torna-se o “elo mais fraco” da estrutura (AÏTCIN, 200). O autor recomenda a utilização no CAR de agregados britados provenientes de rochas duras e densas, como por exemplo, o calcário, a dolomita e rochas ígneas do tipo plutônico (granito, diabásio, diorito, gabro e sienito). Além disso, recomenda-se a redução da dimensão máxima característica do agregado graúdo, como já explicado.

Uma forma indireta de avaliar a resistência do agregado graúdo é pela resistência à degradação. O ensaio recomendado para medir a resistência do agregado à abrasão e à dureza é o equipamento Los Angeles. Segundo a NBR NM 51:2001, no ensaio a amostra de agregado é colocada juntamente com esferas de aço dentro de um tambor, que gira em uma frequência específica, promovendo uma interação entre as partículas de agregados e as esferas. Em seguida é calculada a perda de abrasão. No presente trabalho, por serem utilizados agregados provenientes da Região Metropolitana de Curitiba, os quais Mendes (2002), Freitas (2005) e Bianchini (2010) já provaram serem eficientes para o CAR, não foi realizado o ensaio descrito.

### 3.1.2 Areia artificial

A NBR 9935 (2011) define areia artificial como o material pétreo, proveniente de processos de cominuição mecânica de rochas já britadas, com granulometria entre 4,75mm e 150µm. A areia pode ser submetida, ou não, a processos de classificação para a retirada das partículas de dimensões inferiores a 75µm.

A areia artificial tende a apresentar uma granulometria diferente das areias naturais, normalmente com maior teor de microfinos. A forma é normalmente mais angulosa e lamelar e a textura mais rugosa (WEIDMANN, 2008).

Almeida e Silva, (2005), apontam, a maior uniformidade como vantagem da areia artificial em relação a areia natural facilitando sua utilização junto à argamassa e ao concreto, e por ser uma opção mais barata do que a natural em função do frete.

Em geral, a areia artificial apresenta partículas angulosas, apresentando superfícies recém-criadas pela britagem, não expostas aos processos de intemperismo, como as superfícies das partículas das areias naturais. Além disso, estão presentes nas areias de britagem quantidades significativas de silte e/ou argila. (ALMEIDA, 2005).

A FIGURA 11 exemplifica o processo de britagem apresentando todos os estágios e peneiramento além de uma usina de asfalto anexa, cujas estruturas são a seguir descritas, numeradas de 1 a 12 (WEIDMANN, 2008).



FIGURA 11: VISTA GERAL DE UMA PLANTA DE PEDREIRA: DA BRITAGEM PRIMÁRIA (ESQUERDA - 2) À PILHA DE PÓ-DEPEDRA (DIREITA – 8).  
FONTE: WEIDMANN (2008)

1. Descarga do material fragmentado na alimentação do britador primário;

2. Britagem primária e separação do material em pedra pulmão (3) e pré-classificado (11);
3. Pilha de pedra pulmão para alimentação do britador secundário;
4. Pré-peneiramento separando o material a ser britado e a bica corrida (12)
5. Britagem secundária, terciária e quaternária;
6. Primeiro peneiramento. Possível retorno de material para re-britagem (9);
7. Segundo peneiramento. O material passante na última peneira forma a pilha do pó-de-pedra (8);
8. Pilhas de materiais britados separados em diversas faixas granulométricas para comercialização;
9. Pilha de material retido no primeiro deck dos dois estágios de peneiramento, retornado para britagem no britador terciário (fração mais graúda) e no britador quaternário (fração mais fina);
10. Usina de asfalto anexa;
11. Pilha de material pré-classificado;
12. Pilha de bica-corrida.

O processo de fabricação do material vai influenciar diretamente a classificação, forma, textura de superfície e mesmo na integridade do agregado fabricado por esmagamento e, assim, no seu desempenho em concretos. Segundo Weidmann, (2008), os britadores podem ser classificados em dois grandes grupos: os britadores de compressão e os britadores de impacto. O primeiro engloba os britadores de mandíbulas, cônicos, giratórios e de rolo, o material é esmagado até ser quebrado. Já no segundo, o material é cominuído por rápido impacto contra uma peça de metal ou contra a própria rocha, sendo ainda dividido em britadores de impacto de eixo horizontal e de eixo vertical.

Gonçalves *et. al*, (2007) garantem que entre as várias máquinas de redução de tamanho utilizadas na produção, cone e impacto triturador são os mais comuns. A produção se dá por diferentes trituradores de impacto, em especial os pêndulos de eixo vertical. A moagem neste tipo de triturador é o resultado de propulsão com um rotor de partículas movendo-se a grandes velocidades, contra a bigorna ou de uma

cortina de partículas em queda. Essas condições de carga levam a uma maior probabilidade de fratura de partículas que ocorre por clivagem, com uma contribuição significativa de atrito superficial. O resultado cria partículas com maior integridade e mais formas isométricas são produzidas por este processo de trituração. No caso de britadores de cone, a fratura de partículas depende da condição de carregamento.

Assim, o processo ocorre até que o grão atinja o tamanho adequado. O material passante em uma peneira pré-determinada segue para o segundo peneiramento onde serão separados os agregados graúdos de granulometrias mais finas além do material passante na malha 4,75 mm (WEIDMANN, 2008).

### **3.1.3 Pó de pedra**

Almeida e Silva (2005) explicam que, nas pedreiras, as rochas, ao serem cominuídas em circuitos de britagem na produção de agregados para a construção civil, resultam em quatro produtos comerciais. Os três primeiros encontram aplicações nobres e o último acaba apenas estocado, sendo esses:

- Brita 3: Aplicação em lastro ferroviário;
- Brita 2: Agregado em grandes volumes de concreto e brita de base e sub-base de pavimento;
- Brita 1: Agregado de concreto esbelto e bombeado.
- Brita 0 (12,5 a 4,75 mm) e Pó de pedra (0,075 mm): Finos estocados em pilhas nas áreas das pedreiras.

Dessa maneira, o pó de pedra é caracterizado por apresentar material de granulometria com percentual abaixo de 0,075 mm, em suspensão na água.

O pó de pedra é gerado a partir da lavagem do agregado miúdo de britagem. Injeta-se, sob pressão, um volume representativo de água na peneira classificadora final do britador. Utiliza-se, normalmente, um lavador de roscas helicoidal para separar a mistura (BASTOS, 2003).

É utilizada a lavagem porque a fração fina adere-se às partículas maiores, normalmente não sendo possível separá-la por peneiramento a seco. No processo

de lavagem, o agregado é colocado em um recipiente com água e agitado para que as partículas finas fiquem em suspensão (WEIDMANN, 2008).

O material gerado é composto de uma polpa muito diluída que é disposta em bacias de decantação ou lagoas de captação conforme FIGURA 12. Isto faz com que o assoreamento destes corpos d'água seja um agravante antieconômico ao processo produtivo (BUEST NETO, 2006).

A utilização deste produto é feita em pequena escala, sendo aplicado em obras de pavimentação na confecção de base, sub-base e concreto asfáltico, sendo algumas vezes tratados como sub-produto, resíduo ou até mesmo rejeito.



FIGURA 12: PÓ DE PEDRA ESTOCADO EM PEDREIRA  
FONTE: A AUTORA (2014)

Historicamente, já em 1979, o pó de pedra era utilizado em diversos países, como o Canadá e os Estados Unidos. No Brasil, sua utilização iniciou na década de 80, a partir de estudos técnicos realizados na hidrelétrica de Itaipu, que apresentaram vantagens, técnicas e econômicas da sua aplicação (ANDRIOLO, 2005).

Em estudo no estado de São Paulo, Cuchierato (2000), estimou a produção atual de finos de pedreira superior a 3 milhões de m<sup>3</sup>/ano e que a porcentagem chega, em casos extremos, a corresponder a 40% da produção total de pedras britadas.

### 3.2 CONCRETO COM FINOS

A durabilidade do concreto foi correlacionada por muito tempo com a resistência, mas, devido ao progresso na tecnologia do cimento e do concreto, já no início do século passou a ser possível obter pequena permeabilidade mesmo com alta



relação A/C ou baixo consumo de clínquer. A maior permeabilidade aos agentes agressivos é o principal fator desencadeante de agressões (AÏTCIN, 2000). Já em 2000, o autor afirmava que o concreto de alto desempenho do futuro conteria cada vez menos cimento Portland, cada vez mais materiais cimentícios suplementares ou mesmo adição de fíler.

A substituição de teores do cimento por finos na composição do concreto traz benefícios quanto à resistência e durabilidade, porém pode atrapalhar a trabalhabilidade. Cordeiro, Toledo Filho e Fairbairn (2009) demonstraram que o emprego da cinza da casca de arroz tende a promover melhorias nas propriedades mecânicas e na durabilidade de concretos. Por outro lado, a cinza pode comprometer a trabalhabilidade do concreto em razão da elevada superfície específica de suas partículas e, em alguns casos, do alto teor de carbono remanescente após a queima da casca.

Os finos inertes atuam como um agente de enchimento e ajudam a reduzir o teor total de vazios no concreto. Porém, à medida que a percentagem de pó aumenta, aumenta a superfície específica das partículas do agregado. Assim, é necessário mais água para molhar as superfícies e, conseqüentemente, diminui a trabalhabilidade (CELIK e MARAR, 1996).

A NBR 7211 (2009) fornece o percentual de substâncias nocivas que se pode ter para uma determinada quantidade de agregado, conforme QUADRO 06.

DETERMINAÇÃO	MÉTODO DE ENSAIO		QUANTIDADE MÁXIMA RELATIVA À MASSA DO AGREGADO MIÚDO (%)
Torrões de argila	ABNT NBR 7218		3
Materiais carbonosos	ASTM C 123	Concreto aparente	0,5
		Concreto não aparente	1
Material fino que passa através da peneira 75µm por lavagem (material pulverulento)	ABNT NBR NM 46	Concreto submetido a desgaste superficial	3
		Concreto protegido do desgaste superficial	5
Impurezas orgânicas	ABNT NBR NM 49		A solução obtida no ensaio deve ser mais clara que a solução-padrão
	ABNT NBR 7221	Diferença máxima aceitável entre os resultados de resistência à compressão comparativos	10%
*Quando não for detectada a presença de materiais carbonosos durante a apreciação petrográfica, pode-se prescindir do ensaios de quantificação dos materiais carbonosos (ASTM C 123) *Quando a coloração da solução obtida no ensaio for mais escura do que a solução-padrão a utilização do agregado miúdo deve ser estabelecida pelo ensaio previsto na ABNT 7221			

QUADRO 06: LIMITES PARA SUBSTÂNCIAS NOCIVAS PRESENTES NOS AGREGADOS  
FONTE: NBR 7211:2009

Observa-se no QUADRO 06, que a NBR 7211 (2009) limita a quantidade de material fino passante na 75 $\mu$ m em valores abaixo dos utilizados no presente trabalho. Cabe salientar que para o mesmo, a norma citada considera o material como deletério, pois, por exemplo, em concretos convencionais haveria uma demanda significativamente superior de água. Nesse trabalho, o pó de pedra foi considerado, sob o ponto de vista tecnológico, como contribuinte para a melhoria das propriedades mecânicas dos concretos estudados, e que a utilização de aditivos pode compensar o efeito de material com superfície específica alta nos aspectos reológicos do concreto fresco.

Menose (2004) afirma que a durabilidade de um concreto está diretamente ligada ao comportamento da rede de poros do seu interior. Nesse sentido, em termos da porosidade, a avaliação da intercomunicabilidade e a distribuição dos diâmetros e tamanhos dos poros garantem a durabilidade do concreto. Em relação a manifestações patológicas, a redução da porosidade é a maior responsável pela proteção das armaduras contra a ação da corrosão.

Sob ponto de vista da reologia da pasta, o alto teor de finos é vantajoso em concreto para melhorar a coesão. Porém, como já foi falado, uma quantidade excessiva tende a aumentar a demanda de água e tende a prejudicar a ligação pasta-agregado do cimento (EREN e MARAR, 2009).

### **3.2.1 Empacotamento das partículas**

Segundo Funk e Dinger (1993) o empacotamento de partículas consiste em obter misturas com densidade elevada a partir da seleção de tamanhos adequados de partículas, e no proporcionamento entre as quantidades desses tamanhos. Além de propriedades do concreto endurecido, como porosidade, densidade e resistência, a distribuição de tamanhos das partículas altera as características do material fresco, como a moldagem, taxa de secagem e viscosidade plástica.

As partículas menores se encaixam nos vazios das partículas médias, que por sua vez ocupam os vazios das partículas maiores. A otimização da compacidade na pasta de cimento é realizada utilizando-se um material de maior granulometria e outro de menor granulometria em relação ao cimento (NELSON e GUILLOT, 2006).

A densidade do empacotamento pode ser aumentada à medida que as partículas menores são introduzidas e distribuídas entre os interstícios das partículas maiores. O efeito imediato é a diminuição da porosidade e tamanho de poros. A FIGURA 13 exemplifica alguns tipos de empacotamento.

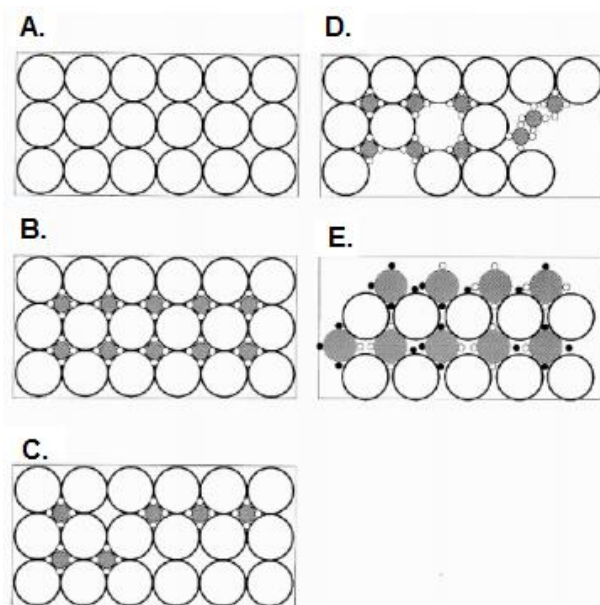


FIGURA 13: EFEITO DA QUANTIDADE E DO TAMANHO DAS PARTÍCULAS NA EFICIÊNCIA DE EMPACOTAMENTO: (A) SISTEMA MONODISPERSO, (B) MÁXIMA DENSIDADE DE EMPACOTAMENTO TEÓRICO, (C) DEFICIÊNCIA DE PARTÍCULAS PEQUENAS, (D) DEFICIÊNCIA DE PARTÍCULAS GRANDES, (E) DISTRIBUIÇÃO INADEQUADA DE TAMANHOS DE PARTÍCULAS  
 FONTE: PANDOLFELLI *et al* (2000)

Além desses conceitos, deve-se levar em conta também, a interação dos grãos que pode levar a dois efeitos, efeito de parede e efeito de afastamento. Por convenção, tem-se que a classe 1 refere-se a grãos maiores e a 2 refere-se a grãos menores em uma mistura binária. Segundo Formagini (2005), o efeito parede é exercido pelos grãos maiores sobre os grãos menores e também pelas fôrmas sobre os grãos. E o efeito de afastamento quando os grãos menores atuam sobre os grãos maiores. O empacotamento da mistura é definido quando os grãos da classe 2 preenchem os vazios deixados pelos grãos maiores, até ocupá-los por completo.

Porém, após o preenchimento total ser atingido, qualquer grão fino que seja adicionado à mistura pode causar perturbação do sistema, produzindo o efeito de afastamento dos grãos de classe maior. As partículas finas são adicionadas e não se ajustam perfeitamente entre as aberturas das partículas maiores prejudicando a densificação. Há aumento do volume de poros e a diminuição a densidade de empacotamento. Nesse caso, a classe 2 tende a ocupar ao máximo o espaço

deixado pela classe 1, exercendo dominância (DE LARRARD, 1999). A FIGURA 14 exemplifica a mistura sem perturbação e com o efeito de afastamento.

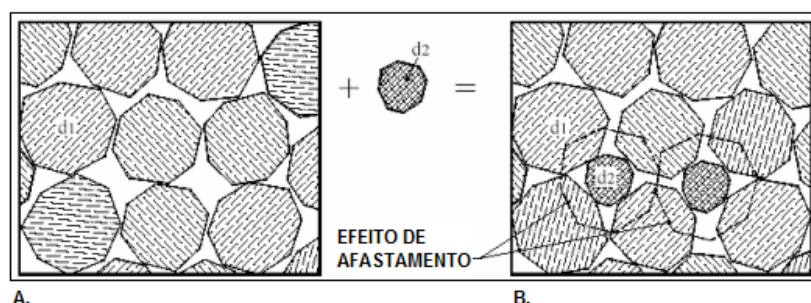


FIGURA 14: INTERAÇÃO PARCIAL DE UMA MISTURA BINÁRIA: A) MISTURA BINÁRIA SEM PERTURBAÇÃO; B) MISTURA BINÁRIA PERTURBADA PELO EFEITO DE AFASTAMENTO  
FONTE: DE LARRARD (1999)

Já o efeito parede, como mencionado anteriormente, ocorre quando for inserida uma partícula maior nas partículas menores dominantes. A parede do agregado graúdo impedirá que os agregados miúdos se aproximem nesta área, dessa forma reduzindo a quantidade em um determinado volume, conforme FIGURA 15 (LARRARD, 1999).

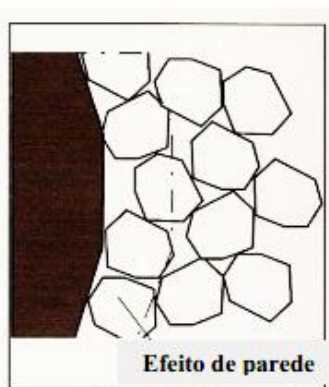


FIGURA 15: EFEITO PAREDE  
FONTE: LARRARD (1999)

De Larrard (1999) ainda explica que quando os diâmetros dos grãos maiores são muito superiores aos dos grãos menores não há interação da mistura, ou há pouca interação. Desse tipo de mistura, não ocorre perturbação do sistema por influência de um grão sobre o outro.

A curva granulometria mais adequada para o concreto vai depender da finalidade de sua aplicação e da trabalhabilidade necessária, Weidmann (2008) afirma que, de maneira geral, as granulometrias contínuas, sem falta ou excesso de algum tamanho

de grão, normalmente conduzem a resultados satisfatórios. Mehta e Monteiro (2008) ressaltam que se deve procurar uma granulometria adequada dentro dos agregados disponíveis em determinada região, sendo que a imposição de composições granulométricas muito estreitas pode ser antieconômica.

#### 4 PROGRAMA EXPERIMENTAL

O desenvolvimento do programa experimental foi realizado no Laboratório de Materiais e Estruturas – LAME/DCC da Universidade Federal do Paraná e no LAME/LACTEC, conveniado à Universidade Federal do Paraná, credenciada pelo INMETRO – Instituto Nacional de Metodologia, Normatização e Qualidade Industrial.

O programa experimental foi dividido em três fases: Argamassas, pastas de cimento Portland e CAR.

A primeira fase procurou verificar o efeito do aditivo e da incorporação do pó de pedra na consistência e na resistência à compressão de argamassas produzidas com areia artificial, variando os teores de pó de pedra e de superplastificante. Os ensaios consistem na substituição de parte da areia artificial pelo pó de pedra nos teores 0%, 6%, 12% e 18%. Cabe ressaltar, que nessa etapa, a quantidade de aglomerante foi mantida, com o objetivo de estudar aumentos significativos da superfície específica da mistura. O teor de superplastificante foi definido em 0%, 0,3%, 0,6%, 0,9% e 1,20% do teor total de finos (cimento, sílica ativa e pó de pedra). Ensaios pilotos realizados com valores acima de 1,2% levaram à segregação das mesmas. Trata-se de um projeto tipo fatorial de dois fatores cruzados, 4x5, sendo quatro níveis de substituição da areia artificial pelo pó de pedra e cinco teores de superplastificantes analisados. Nessa etapa os ensaios realizados foram:

- Determinação do índice de consistência da argamassa, NBR-13276:2005 e pelo ensaio de minicone de Kantro;
- Resistência à compressão das argamassas, NBR-5739:2007.

A segunda fase procurou determinar o teor ótimo do superplastificante em pastas de cimento Portland com pó de pedra e comparar a fluidez da pasta de cimento Portland produzida com pó de pedra que passou pelo processo de peneiramento na #200, em laboratório, com a pasta produzida sem o pó de pedra passar pelo processo de peneiramento em laboratório. Os ensaios consistem na substituição de parte do cimento Portland pelo pó de pedra nos teores 0%, 6%, 12% e 18%. O teor de superplastificante foi definido em 0%, 0,3%, 0,6%, 0,9%, 1,20% e 1,6% do teor total de finos. Trata-se de um projeto tipo fatorial de dois fatores cruzados, 4x6, sendo quatro níveis de substituição do cimento Portland pelo pó de

pedra e seis teores de superplastificantes analisados. Nessa etapa o ensaio realizado foi:

- Determinação do índice de consistência pelo ensaio de minicone de Kantro.

A terceira fase foi realizada com os resultados dos estudos anteriores, foram analisados CAR, variando a resistência à compressão alvo e os teores de pó. Para efeito de validação externa, foram adotados parâmetros similares aos utilizados por Mendes, em 2002, cujos resultados foram cotejados com aqueles resultados do presente trabalho. Foram definidos quatro níveis de resistência: 50MPa, 65MPa, 80MPa e 95MPa, e, novamente, com quatro teores distintos de pó de pedra: 0%, 6%, 12% e 18% em substituição ao cimento Portland. A idade foi definida em 3, 7 e 28 dias para os ensaios de resistência à compressão, para analisar a evolução da mesma, e, para ensaios de tração por compressão diametral e módulo de elasticidade, a idade de 28 dias. Devido às suas características, o experimento trata-se de um projeto tipo fatorial de dois fatores cruzados 4x4, sendo quatro níveis de resistência e quatro teores de substituição do cimento Portland pelo pó de pedra. Nessa etapa os ensaios realizados foram:

- Resistência à compressão, NBR-5739:2007;
- Resistência à tração por compressão diametral, NBR-7222:2011;
- Módulo de elasticidade, NBR-8522:2008.

Além das propriedades mecânicas, foram analisadas as reduções dos consumos de cimento, as missões de CO<sub>2</sub> e os custos dos concretos produzidos. A análise feita quanto às emissões de CO<sub>2</sub> baseou-se na mesma realizada por Bianchini (2010), levando em conta somente a emissão na fabricação do cimento, já que, como enfatizou o autor, o método de dosagem apresentou quantidades de agregado por unidades de volume semelhantes, quantidade de aditivo, comparativamente ao volume total, pequeno e os concretos produzidos obtiveram consistências semelhantes, levando a consumos próximos de energia. Além disso, as emissões foram comparadas às de concretos convencionais. Os custos foram calculados utilizando valores unitários de cada material fornecido pelos fabricantes, transformados em R\$/MPa para comparar o custo com a resistência obtida dos concretos e comparados com concretos convencionais.

Os resultados foram analisados tecnicamente, do ponto de vista estatístico e comparados com os resultados encontrados em Mendes (2002).

Para a análise estatística foram realizadas análises de variância para cada experimento, a fim de avaliar estatisticamente a influência dos parâmetros do processo nas variáveis de resposta, bem como a existência de alguma possível interação entre os fatores. A análise de variância consiste em comparar os resultados obtidos na distribuição F de Snedecor, com valores tabelados. Se o valor calculado for maior que o valor tabelado, a influência é significativa, ou seja, o parâmetro do processo estudado influencia na variável de resposta.

No caso da influência dos parâmetros ser significativa, procedeu-se com a comparação múltipla de médias. A comparação é feita a partir dos desvios padrões das médias e do limite de decisão (três vezes o desvio padrão das médias). Os resultados são comparados dois a dois, no caso da diferença entre eles ser maior que o limite de decisão, a diferença é significativa.

#### 4.1 MATERIAIS EMPREGADOS

Para a realização do estudo experimental optou-se pela utilização de materiais obtidos na região metropolitana de Curitiba, com o intuito de aplicação prática dos resultados. Devido a crescente utilização de concretos dosados em central nesta região, foram empregados agregados utilizados usualmente em uma empresa que fornece esse tipo de serviço, utilizando inclusive areia artificial e pó de pedra das centrais de britagem usadas para fornecimento dos agregados empregados na confecção de concreto.

A rocha matriz de todos os agregados é o calcário, sendo que todas as frações granulométricas são originárias da mesma pedreira.

##### 4.1.1 Cimento

Utilizou-se o cimento CP V-ARI. Segundo Bianchini (2010), as empresas que produzem CAR utilizam esse cimento devido a sua maior resistência em comparação com os outros cimentos, e sua característica de alta resistência inicial.



As especificações técnicas estão apresentadas no QUADRO 07, a granulometria no QUADRO 08 e a distribuição granulométrica na FIGURA 16.

FÍSICAS			QUÍMICAS	
Massa específica (kg/dm <sup>3</sup> )		3,00	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	4,25
Expan. Quente (mm)		0,2	SiO <sub>2</sub> (%)	18,82
Tempo de pega	Início (h:min)	02:38	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	2,57
	Fim (h:min)	03:15	CaO (%)	60,55
Consis. Nomal (%)		28	MgO (%)	4,84
Blaine (cm <sup>2</sup> /g)		4085	SO <sub>3</sub> (%)	2,88
# 200 (%)		0,41	Perda fogo (%)	2,87
# 325 (%)		3,23	CaO livre (%)	0,82
Resistência a compressão (MPa)	1 (dia)	22,1	Resid. Insolúvel (%)	0,72
	3 (dias)	38,1	Equiv. Alcal. (%)	0,61
	7 (dias)	43,8		
	28 (dias)	51,9		

QUADRO 07: ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS CP V-ARI  
FONTE: FABRICANTE (2014)

GRANULOMETRIA CP -V - ARI	
DIÂMETRO	VALOR CUMULATIVO (%)
0,04	0,18
0,5	4,51
1	10,98
3	29,88
6	48,76
10	66,72
20	93,92
28	99,46
36	100
FINOS - MICRÔMETROS	
DIÂMETRO A 10%	0,93
DIÂMETRO A 50%	6,24
DIÂMETRO A 90%	17,72
DIÂMETRO MÉDIO	7,97

QUADRO 08: GRANULOMETRIA CP V-ARI  
FONTE: A AUTORA (2014)

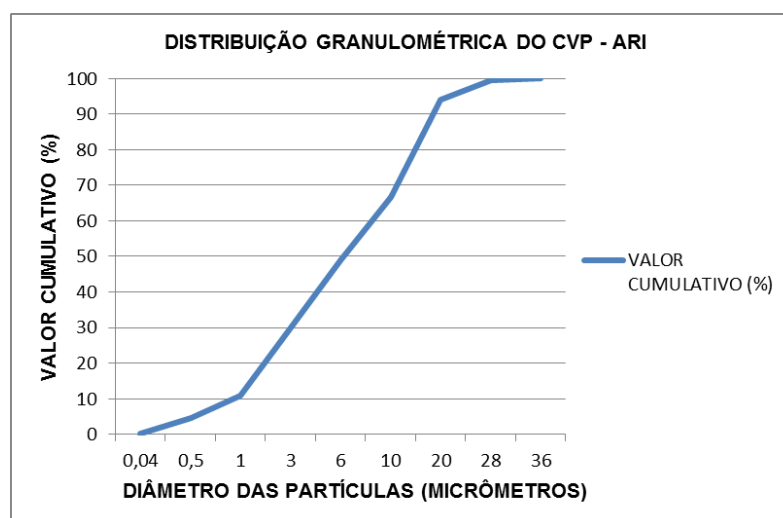


FIGURA 16: DISTRIBUIÇÃO DO GRANULOMÉTRICA CP V – ARI  
FONTE: A AUTORA (2014)

#### 4.1.2 Agregado miúdo

Optou-se pela utilização de areia 100% artificial, devido às restrições ambientes no uso da areia natural, como descrito anteriormente. A granulometria do agregado miúdo está apresentada no QUADRO 08, as características no QUADRO 09 e a curva granulométrica na FIGURA 17.

GRANULOMETRIA AGREGADO MIÚDO - NBR 7211:2009		
PENEIRA	% MÉDIA RETIDA	% MÉDIA ACUMULADA
2,4	4	4
1,2	40	44
0,6	24	68
0,3	14	82
0,15	10	92
0,075	5	97
Fundo	3	100

QUADRO 09: CARACTERIZAÇÃO GRANULOMÉTRICA AGREGADO MIÚDO  
FONTE: FABRICANTE (2014)

CARACTERIZAÇÃO AGREGADO MIÚDO		
MASSA ESPECÍFICA - NBR NM 52:2009 (Kg/dm <sup>3</sup> )	MASSA UNITÁRIA - NBR NM 45:2006 (Kg/dm <sup>3</sup> )	MATERIAL PULVERULENTO - NBR NM 46:2003(%)
2,79	1,37	2,1

QUADRO 10: CARACTERÍSTICAS AGREGADO MIÚDO  
FONTE: FABRICANTE (2014)

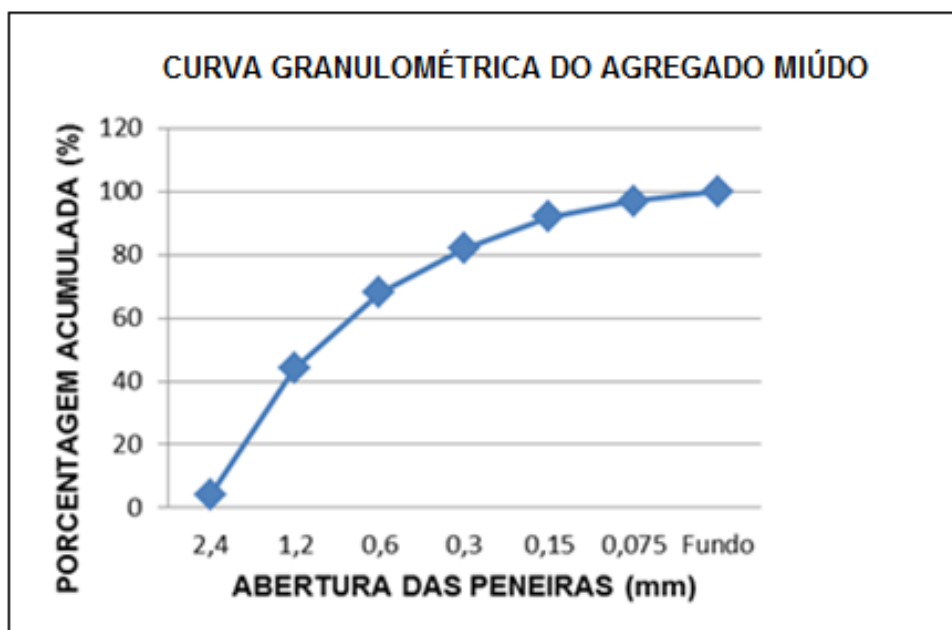


FIGURA 17: DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA AGREGADO MIÚDO  
FONTE: A AUTORA (2014)

### 4.1.3 Pó de pedra

O material obtido pelo processo de britagem da areia artificial, proveniente do calcário em suspensão na água, foi coletado FIGURA 18, posteriormente seco em estufa no laboratório com temperatura de 60°C e destorrado manualmente por cerca de 5 horas.



FIGURA 18: PÓ COLETADO EM PEDREIRA  
FONTE: A AUTORA (2014)

A caracterização do pó e a massa específica estão apresentadas no QUADRO 11 e a curva granulométrica graficamente na FIGURA 19.

PÓ DE PEDRA SEM PENEIRAR					
MASSA ESPECÍFICA	2,67 kg/dm³				
MASSA INICIAL	80g			DATA	10/10/2014
MALHAS (TYLER)	ABERTURA (mm)	MASSA RETIDA (g)	% PESO	% ACUMULADA ACIMA	% ACUMULADA ABAIXO
5	4	1,94	2,43	2,43	97,58
9	2	1,03	1,29	3,71	96,29
16	1	0,68	0,85	4,56	95,44
32	0,5	0,71	0,89	5,45	94,55
60	0,25	1,73	2,16	7,61	92,39
Laser	0,18	0,46	0,57	8,19	91,81
Laser	0,09	11,87	14,84	23,02	76,98
Laser	0,063	7,38	9,22	32,24	67,76
Laser	0,043	4,72	5,89	38,14	61,86
Laser	0,036	2,44	3,05	41,19	58,81
Laser	0,028	4,41	5,51	46,69	53,31
Laser	0,02	6,59	8,24	54,93	45,07
Laser	0,01	11,8	14,75	69,68	30,32
Laser	0,006	6,33	7,91	77,59	22,41
Laser	0,003	6,58	8,22	85,81	14,19
Laser	0,001	7,23	9,04	94,84	5,16
Laser	0	4,12	5,16	100	0
MASSA FINAL (g)	80	FINOS ABAIXO #60 - MICRÔMETROS			
		Diâmetro 10%		1,81	
		Diâmetro 50%		20,98	
		Diâmetro 90%		110,31	
		Diâmetro médio		40,43	

QUADRO 11: CARACTERIZAÇÃO PÓ DE PEDRA  
FONTE: A AUTORA (2014)

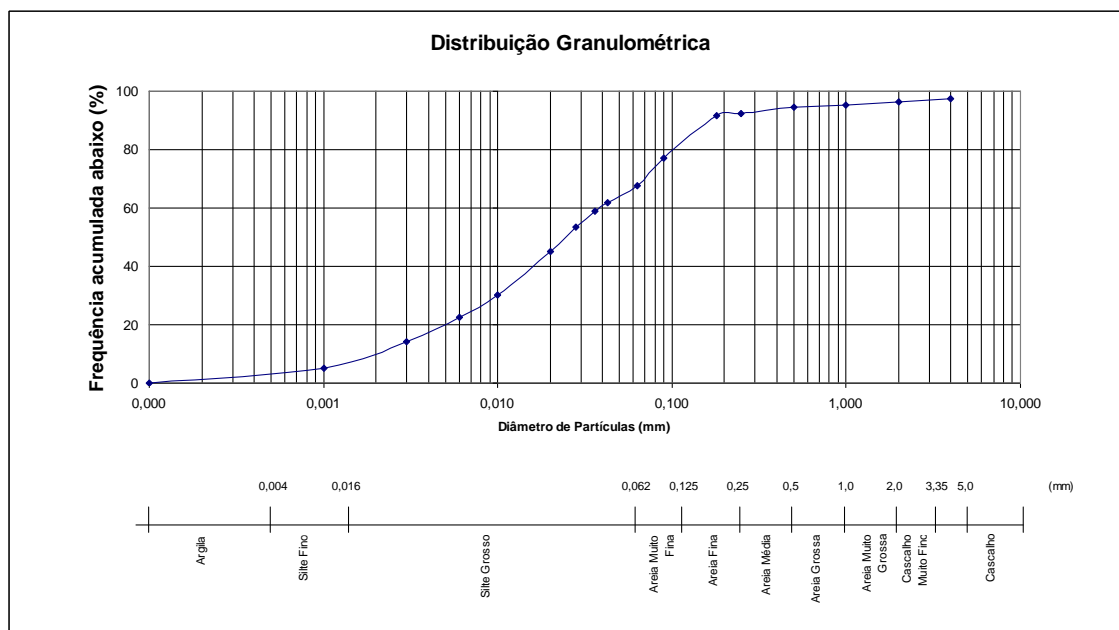


FIGURA 19: DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA PÓ DE PEDRA  
 FONTE: A AUTORA (2014)

#### 4.1.4 Agregado graúdo

O agregado graúdo utilizado é proveniente do calcário com DMC de 19mm. A granulometria está apresentada no QUADRO 12, as suas características no QUADRO 13 e a curva granulométrica e na FIGURA 20.

GRANULOMETRIA AGREGADO GRAÚDO - NBR 7211:2009		
PENEIRA	% MÉDIA RETIDA	% MÉDIA ACUMULADA
19	12	12
12,5	47	59
9,5	29	88
6,3	11	99
4,8	-	99
Fundo	1	100

QUADRO 12: CARACTERIZAÇÃO GRANULOMÉTRICA DO AGREGADO GRAÚDO  
 FONTE: FABRICANTE (2014)

CARACTERIZAÇÃO AGREGADO GRAÚDO		
MASSA ESPECÍFICA - NBR NM 53:2009 (Kg/dm³)	MASSA UNITÁRIA - NBR NM 45:2006 (Kg/dm³)	MATERIAL PULVERULENTO - NBR NM 46:2003(%)
2,81	1,45	1,3

QUADRO 13: CARACTERÍSTICAS AGREGADO GRAÚDO  
 FONTE: FABRICANTE (2014)

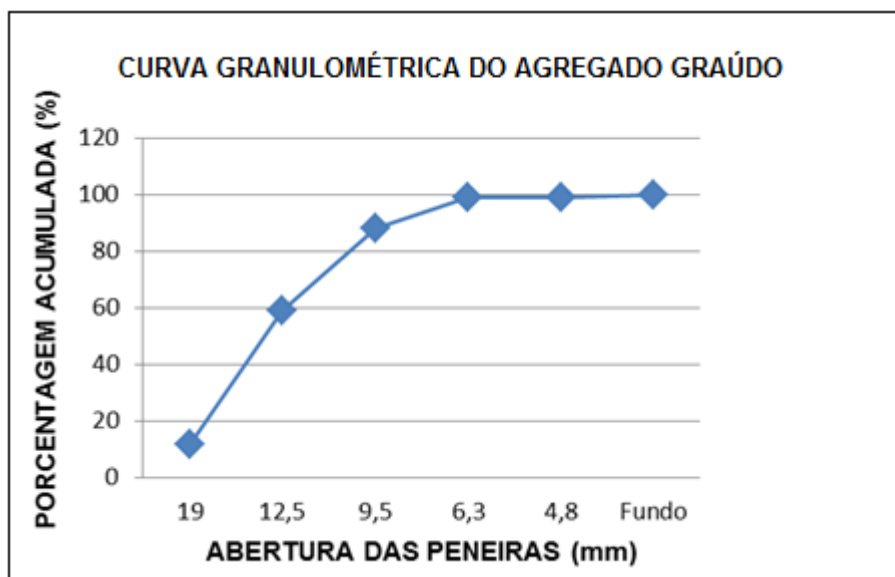


FIGURA 20: DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA BRITA  
 FONTE: FABRICANTE (2014)

#### 4.1.5 Sílica ativa

A sílica ativa utilizada é decorrente do processo de fabricação do sílico metálico ou do ferro sílico, de onde é gerado o gás  $\text{SiO}$ , que ao sair do forno elétrico oxida-se, formando o  $\text{SiO}_2$ , sendo então captado por filtros manga e devidamente armazenado em silo para a sua comercialização. O QUADRO 14 resume as principais características desse material.

CARACTERÍSTICAS FÍSICAS E QUÍMICAS DA SÍLICA ATIVA UTILIZADA	
Massa específica	2,2 $\text{kg/dm}^3$
Superfície específica	20000 $\text{m}^2/\text{kg}$
Formato da partícula	Esférico
Diâmetro médio	0,2 $\mu\text{m}$
Teor de $\text{SiO}_2$	Mínimo 85%
Umidade	Máximo 3%

QUADRO 14: ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS - SÍLICA ATIVA  
 FONTE: FABRICANTE (2014)

#### 4.1.6 Aditivo superplastificante

O aditivo superplastificante utilizado consiste em um produto de terceira geração, baseado em polímeros de éteres carboxílicos modificados. Atende aos requisitos da NBR 11768:2011 e é compatível com todos os tipos de cimento Portland. O QUADRO 15 apresenta as especificações técnicas do mesmo.

Recomendações técnicas para aplicação	pH (ABNT 10908:2008)	Massa específica (ABNT 10908:2008)	Teor de sólidos	
			Mín.	Máx.
Aditivo desenvolvido para a obtenção de concretos de alto desempenho.	$5,5 \pm 1,0$	$1,100 \pm 0,02 \text{ g/cm}^3$	44,35%	49,01%

QUADRO 15: ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS SUPERPLASTIFICANTE  
 FONTE: FABRICANTE (2014)

## 4.2 MÉTODO

### 4.2.1 Argamassa

O programa experimental iniciou-se pela análise da perda de consistência da argamassa de cimento Portland, produzida com um traço padrão, sem a presença de pó e com adição de pó de pedra que passou pelo processo de peneiramento em laboratório na #200. O índice de consistência da argamassa foi medido de acordo com a norma:

- Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Preparo da mistura e determinação do índice de consistência – NBR-13276:2005.

O ensaio de determinação do índice de consistência utilizando superplastificantes tem limites detectados dados por:

- Extensão da Flow-Table, que limita os valores que podem ser medidos;
- A mistura deve ter coesão suficiente que impeça a segregação da argamassa com a utilização do aditivo.

Para determinação do traço inicial, adotou-se argamassa com consistência seca. Observando argamassas utilizadas em centrais de concreto, juntamente com tentativas prévias em laboratório, definiu-se empiricamente o traço padrão ou base, TABELA 01. Deve ser ressaltado que nos diversos ensaios foram feitas substituições de parte da areia artificial lavada por pó nos teores definidos. A quantidade de aglomerante foi mantida, indicando que nos casos estudados há um aumento significativo da superfície específica da mistura.

Os traços usados nas argamassas estão apresentados na TABELA 01, variando o teor de pó de pedra em substituição a areia artificial e os teores de superplastificante, calculados em cima do total de finos (cimento, pó de pedra e sílica ativa).

TABELA 01: TRAÇO – ARGAMASSA

TRAÇOS ARGAMASSA							
% PÓ	% SP	PÓ (Kg)	SP (Kg)	AREIA (Kg)	CIMENTO (Kg)	ÁGUA (Kg)	SÍLICA ATIVA (Kg)
0	0	0	0,00	1408,00	490	300	35
	0,3	0	1,58	1408,00	490	300	35
	0,6	0	3,15	1408,00	490	300	35
	0,9	0	4,73	1408,00	490	300	35
	1,2	0	6,30	1408,00	490	300	35
6	0	84,48	0,00	1323,52	490	300	35
	0,3	84,48	1,83	1323,52	490	300	35
	0,6	84,48	3,66	1323,52	490	300	35
	0,9	84,48	5,49	1323,52	490	300	35
	1,2	84,48	7,31	1323,52	490	300	35
12	0	168,96	0,00	1239,04	490	300	35
	0,3	168,96	2,08	1239,04	490	300	35
	0,6	168,96	4,16	1239,04	490	300	35
	0,9	168,96	6,25	1239,04	490	300	35
	1,2	168,96	8,33	1239,04	490	300	35
18	0	253,44	0,00	1154,56	490	300	35
	0,3	253,44	2,34	1154,56	490	300	35
	0,6	253,44	4,67	1154,56	490	300	35
	0,9	253,44	7,01	1154,56	490	300	35
	1,2	253,44	9,34	1154,56	490	300	35

FONTE: A AUTORA (2014)

Nesse experimento foi analisado o efeito de cada parâmetro no processo, a o teor de pó de pedra e o teor de superplastificante. A variável de resposta é o espalhamento da argamassa e os fatores controláveis conforme TABELA 02.

TABELA 02: FATORES CONTROLÁVEIS – ARGAMASSA

PARÂMETROS DO PROCESSO		AJUSTE ATUAL	INTERVALO DE AJUSTE		FACILIDADE DE AJUSTE
X1	Teor de pó pedra	0%	0%	18%	1
X2	Teor de superplastificante	0%	0%	1,20%	2

FONTE: A AUTORA (2014)

Conforme descrito anteriormente, o teor de substituição de pó de pedra foi definido em 0%, 6%, 12% e 18%. Segundo BONAVETTI e IRASSAR (1994), valores acima de 20% de substituição aumentam significativamente a demanda de água. O teor de superplastificante foi definido em 0%, 0,3%, 0,6%, 0,9% e 1,20%. Ensaios pilotos realizados com valores acima de 1,2% levaram à segregação da argamassa.

A sequência da mistura dos materiais na argamassadeira foi constante para todos os traços e a velocidade 1, mais lenta. Segue a sequência da mistura:

1. Todo material seco foi colocado na argamassadeira e misturado por 30 segundos;
2. Pausa na argamassadeira, e com uma espátula foi raspado o material aderido à cuba, e por mais 30 segundos foi feita a homogeneização dos materiais secos;
3. Aproximadamente 90% da água misturada por 30 segundos.
4. 100% do aditivo superplastificante, juntamente com restante da água, por mais 30 segundos homogeneização;
5. Novamente com o auxílio da espátula foi feito a raspagem do material aderido a cuba e misturado por mais 60 segundos

A FIGURA 21 apresenta o processo de mistura dos materiais na argamassadeira.





FIGURA 21: MISTURA DOS MATERIAIS NA ARGAMASSADEIRA  
FONTE: A AUTORA (2014)

Após o período de mistura foram realizados os ensaios. Os métodos para analisar a consistência da argamassa de cimento com adição de pó de pedra foram pelos ensaios de mesa de consistência (flow table) e pelo mini abatimento de cone (cone de Kantro), segundo a NBR-13276:2005 e Castro (2007), respectivamente.

O primeiro consiste em medir o espalhamento horizontal da argamassa moldada na forma de um cone padrão, onde o material é submetido a sucessivos impactos após a retirada do cone (FIGURA 22), o espalhamento foi medido em três diâmetros diferentes com régua com a precisão de uma casa decimal.

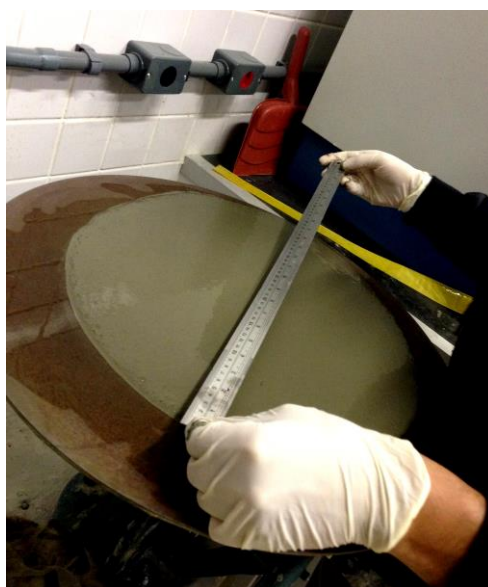


FIGURA 22: ENSAIO REALIZADO: MESA DE CONSISTÊNCIA  
FONTE: A AUTORA (2014)

Já o ensaio de abatimento através do minitronco de cone foi desenvolvido por Kantro em 1980, e consiste na determinação do abatimento da pasta de cimento por meio do minicone. No ensaio, o equipamento utilizado consiste em um tronco de cone metálico aberto em ambas as extremidades, mantido apoiado sobre uma placa metálica não-absorvente (KRUG, 2011). Apesar dos ensaios de abatimento do minicone de Kantro serem em geral utilizados para estudos reológicos de pastas, esta dissertação procura avaliar sua utilização em argamassas. A argamassa é lançada no equipamento que é levantado verticalmente. Dessa forma, a mesma sofre um espalhamento que é medido (CASTRO, 2007). A partir do espalhamento do material, o ensaio avalia a fluidez do mesmo. Como vantagens, o ensaio requer pequenas quantidades de material e equipamento simplificado (MENDES, 2002). O espalhamento foi medido em três diâmetros diferentes, com paquímetro com a precisão de duas casas decimais, conforme FIGURA 23.



FIGURA 23: ENSAIO REALIZADO: MINICONE DE KANTRO  
FONTE: A AUTORA (2014)

Com as mesmas argamassas, definidas nas matrizes experimentais, foram moldados corpos de prova de 5 x 10 cm, conforme FIGURA 23, a fim de analisar o comportamento da resistência da argamassa com a adição de diferentes teores de pó de pedra. O ensaio de resistência à compressão dos corpos de prova foi executado segundo a norma:

- Resistência à compressão – NBR-5739:2007.

Foram moldados dois corpos de prova para cada traço, conforme determina a norma. As formas foram lubrificadas com desmoldante, foram compactados manualmente e a cura foi em temperatura ambiente, no laboratório. Para a execução das rupturas dos CPs foi utilizada prensa, marca EMIC, DL-10000 com capacidade máxima de 100kN, FIGURA 24. O prato inferior da prensa é fixo e o superior tem cabeça esférica, para acertar diferenças de paralelismo entre as faces dos CPs. Antes do início de cada ensaio foi verificada a centralização do CP no prato inferior.



FIGURA 24: CORPOS DE PROVA - ARGAMASSA  
FONTE: A AUTORA (2014)



FIGURA 25: ROMPIMENTO CORPO DE PROVA - ARGAMASSA  
FONTE: A AUTORA (2014)

#### 4.2.2 Pasta de cimento

Os finos que constituem o pó de pedra reduzem a fluidez da pasta devido à sua maior superfície específica, que exigem mais água na mistura para molhar a superfície das partículas adequadamente, como destacado anteriormente. O teor adequado de aditivos superplastificantes é necessário para solucionar o problema da redução de fluidez.

O teor ótimo de superplastificante foi definido na pasta com substituição do cimento Portland pelo pó de pedra. O teor de superplastificante foi determinado em cima da porcentagem total de finos - cimento, pó de pedra e sílica ativa. Os traços utilizados para cada teor de pó de pedra e de superplastificante estão apresentados na TABELA 03.

TABELA 03: TRAÇO – PASTA DE CIMENTO

TRAÇOS PASTA DE CIMENTO PORTLAND						
% PÓ	% SP	PÓ (Kg)	SP (Kg)	CIMENTO (Kg)	ÁGUA (Kg)	SÍLICA ATIVA (Kg)
0	0	0	0,00	980	600	70
	0,3	0	3,15	980	600	70
	0,6	0	6,30	980	600	70
	0,9	0	9,45	980	600	70
	1,2	0	12,60	980	600	70
	1,6	0	16,80	980	600	70
6	0	58,8	0,00	921,2	600	70
	0,3	58,8	3,15	921,2	600	70
	0,6	58,8	6,30	921,2	600	70
	0,9	58,8	9,45	921,2	600	70
	1,2	58,8	12,60	921,2	600	70
	1,6	58,8	16,80	921,2	600	70
12	0	117,6	0,00	862,4	600	70
	0,3	117,6	3,15	862,4	600	70
	0,6	117,6	6,30	862,4	600	70
	0,9	117,6	9,45	862,4	600	70
	1,2	117,6	12,60	862,4	600	70
	1,6	117,6	16,80	862,4	600	70
18	0	176,4	0,00	803,6	600	70
	0,3	176,4	3,15	803,6	600	70
	0,6	176,4	6,30	803,6	600	70
	0,9	176,4	9,45	803,6	600	70
	1,2	176,4	12,60	803,6	600	70
	1,6	176,4	16,80	803,6	600	70

FONTE: A AUTORA (2014)

A sequência da mistura dos materiais na argamassadeira foi constante para todos os traços e a mesma utilizada na produção das argamassas.

O método de análise da consistência da pasta foi pelo cone de Kantro. Não foi realizado o método da mesa de consistência nessa etapa devido à alta fluidez da pasta, decorrente da utilização do superplastificante, que resulta em espalhamentos maiores que o diâmetro da mesa, assim, impossibilitando a medição do espalhamento por esse método.

Para avaliar o efeito do peneiramento pela 0,075mm, repetiu-se o ensaio anterior na pasta de cimento com o pó na condição real, ou seja, sem passar pelo processo de peneiramento.

#### **4.2.3 Concreto**

Para a caracterização mecânica foram realizados os seguintes ensaios nos corpos de prova de concreto:

- Resistência à compressão – NBR-5739:2007;
- Resistência à tração por compressão diametral – NBR-7222:2011;
- Módulo de elasticidade – NBR-8522:2008.

Cabe ressaltar que em todos os concretos avaliados o abatimento foi superior que 250 mm, comportamento comum às misturas com concreto de alta resistência, e coerente com os resultados de Mendes (2002), Freitas (2005) e Bianchini (2010).

Como descrito, o método de dosagem definido foi o proposto por AITCIN (2000), por ser o mesmo utilizado por Mendes (2002), de forma a garantir a validade externa do experimento e a fim de comparar os resultados obtidos no presente trabalho com os do autor. Foram definidos quatro níveis de resistência, os mesmos usados por Mendes (2002) (TABELA 04) e novamente com quatro teores distintos de pó de pedra: 0%, 6%, 12% e 18%.

TABELA 04: FAIXAS DE RESISTÊNCIAS ESPERADAS

CLASSE	FAIXA DE RESISTÊNCIA ESPERADA (MPa)	RELAÇÃO A/A
1	50	0,35
2	65	0,31
3	80	0,28
4	95	0,26

FONTE: AITCIN (2000)

A idade foi definida em 3, 7 e 28 dias para os ensaios de resistência à compressão, para analisar a evolução da mesma, e, para ensaios de tração por compressão diametral e módulo de elasticidade, na idade de 28 dias. Foram adotados três corpos-de-prova para as resistências à compressão, três à tração por compressão diametral e três corpos-de-prova para a determinação de módulo de elasticidade, a fim de dar validade às conclusões experimentais. Assim, para cada traço definido, foram necessários 15 corpos de prova. A quantidade dos corpos de prova total está ilustrada na TABELA 05.

TABELA 05: DEFINIÇÃO DOS CPs

	PÓ DE PEDRA											
	0%			6%			12%			18%		
	IDADE (DIAS)			IDADE (DIAS)			IDADE (DIAS)			IDADE (DIAS)		
FAIXA DE RESISTÊNCIA	3	7	28	3	7	28	3	7	28	3	7	28
1	3 CPs	3 CPs	9 CPs	3 CPs	3 CPs	9 CPs	3 CPs	3 CPs	9 CPs	3 CPs	3 CPs	9 CPs
2	3 CPs	3 CPs	9 CPs	3 CPs	3 CPs	9 CPs	3 CPs	3 CPs	9 CPs	3 CPs	3 CPs	9 CPs
3	3 CPs	3 CPs	9 CPs	3 CPs	3 CPs	9 CPs	3 CPs	3 CPs	9 CPs	3 CPs	3 CPs	9 CPs
4	3 CPs	3 CPs	9 CPs	3 CPs	3 CPs	9 CPs	3 CPs	3 CPs	9 CPs	3 CPs	3 CPs	9 CPs
TOTAL	240 CORPOS DE PROVA											

FONTE: A AUTORA (2014)

As TABELAS 06, 07 e 08 apresentam os parâmetros do processo, as variáveis de resposta e os fatores de ruído, respectivamente. Sendo que os valores esperados nas variáveis de resposta foram os mínimos e máximos encontrados por Mendes (2002), por ser a referência utilizada no presente trabalho.

TABELA 06: PARÂMETROS DO PROCESSO

PARÂMETROS DO PROCESSO		AJUSTE ATUAL	INTERVALO DE PESQUISA		FACILIDADE DE AJUSTE
X1	Quant. Pó de pedra	0%	0%	18%	1
X2	Relação A/A	-	0,26	0,35	2

FONTE: A AUTORA (2014)

TABELA 07: VARIÁVEIS DE RESPOSTA

VARIÁVEIS DE REPOSTA		TIPO	ALVO (UNIDADE)	ESPECIFICAÇÕES	
				MIN	MÁX
Y1	Resistência à compressão	Maior é melhor	Faixa de resistência	50	120
Y2	Resistência à tração	Maior é melhor	Faixa de resistência	5	6,4
Y3	Módulo de elasticidade	Maior é melhor	Faixa de resistência	36	43

FONTE: A AUTORA (2014)

TABELA 08: FATORES DE RUÍDO

FATORES DE RUÍDO	
Z1	Erro do profissional que executará os ensaios
Z2	Temperatura ambiente
Z3	Tempo para execução do ensaio após o início da mistura

FONTE: A AUTORA (2014)

#### 4.2.4 Preparação dos corpos de prova de concreto

Com as faixas de resistência esperadas a partir das relações A/A, os parâmetros iniciais e os materiais definidos, o próximo passo foi a dosagem.

Considerando a quantidade excessiva de finos nos concretos produzidos e após análises preliminares que demonstraram a influência da adição de finos na consistência da pasta de cimento e da argamassa, a quantidade de

superplastificante teve que ser ajustada para cada traço no momento da produção do concreto. Como base inicial, foi utilizado o teor de superplastificante considerado ótimo, resultante dos estudos com argamassas e pastas.

O traço base, sem a adição de pó de pedra, foi o mesmo utilizado no trabalho de Mendes (2000) com calcário, assim, podendo comparar os resultados obtidos na pesquisa do autor. Além de poder analisar a influência da utilização de 100% de areia artificial, visto que, Mendes (2000), utilizou apenas areia natural em sua pesquisa. A TABELA 09 apresenta a planilha de dosagem utilizada nos traços com 0% de pó de pedra para os quatro níveis de resistência definidos, 50MPa, 65 MPa, 80MPa e 95MPa. Após os ensaios tentativos iniciais, para os quatro níveis de resistências foi definido o teor de superplastificante em 1,2% da quantidade total de finos (cimento, sílica ativa e pó de pedra) para garantir consistência adequada para moldagem dos CPs, ajustados conforme a necessidade.

TABELA 09: DOSAGEM UTILIZADA NOS TRAÇOS COM 0% DE PÓ

TRAÇO COM 0% DE PÓ				
TRAÇO	1	2	3	4
NÍVEL DE RESISTÊNCIA	50 MPa	65 MPa	80 MPa	95 MPa
Cimento (Kg)	362	409	452	486
Sílica Ativa (Kg)	31	35	39	42
Areia Artificial (Kg)	900	854	815	784
Pó de pedra (Kg)	0	0	0	0
Brita (Kg)	1053	1054	1053	1054
Água (l)	137	137	137	137
Água/aglomerante	0,35	0,31	0,28	0,26
Aditivo (Kg)	4,72	5,33	5,89	6,34
Teor de Argamassa seca (%)	55,12	55,19	55,36	55,45

FONTE: A AUTORA (2014)

Para os próximos traços, com 6%, 12% e 18% de pó de pedra manteve-se a mesma quantidade de agregados miúdos e graúdos utilizado no traço base. A quantidade de aglomerante foi determinada de acordo com a substituição de pó de pedra para cada traço. Assim, foi definida como o total de aglomerante do traço base (cimento mais sílica ativa) menos o pó de pedra.

Optou-se pela substituição do aglomerante pelo pó de pedra, a fim de reduzir o total de cimento utilizado e para verificar a influência da substituição nas propriedades mecânicas do concreto, procurando manter o total de finos na mistura.



Para o traço com 6% de pó de pedra, o teor de superplastificante em 1,2% da quantidade total de finos foi adequado para garantir consistência dos CPs e a planilha de dosagem está apresentada na TABELA 10.

TABELA 10: DOSAGEM UTILIZADA NOS TRAÇOS COM 6% DE PÓ

TRAÇO COM 6% DE PÓ				
TRAÇO NÍVEL DE RESISTÊNCIA	1 50 MPa	2 65 MPa	3 80 MPa	4 95 MPa
Cimento (Kg)	312,27	361,79	407,24	443,04
Sílica Ativa (Kg)	26,73	30,97	34,86	37,92
Areia Artificial (Kg)	900	854	815	784
Pó de pedra (Kg)	54	51,24	48,9	47,04
Brita (Kg)	1053	1054	1053	1054
Água (l)	118,65	121,7556	123,788	125,0496
Água/aglomerante	0,35	0,31	0,28	0,26
Aditivo (Kg)	4,72	5,33	5,89	6,34
Teor de Argamassa seca (%)	55,12	55,19	55,36	55,45

FONTE: A AUTORA (2014)

Para o traço com 12% de pó de pedra o teor de superplastificante em 1,2% da quantidade total de finos foi suficiente para os dois primeiros níveis de resistência, 50MPa e 65MPa, porém, para o terceiro e quarto nível, 80MPa e 95MPa, devido às baixíssimas relações A/A, foi necessário aumentar o teor para 1,5%. A planilha de dosagem está apresentada na TABELA 11.

TABELA 11: DOSAGEM UTILIZADA NOS TRAÇOS COM 12% DE PÓ

TRAÇO COM 12% DE PÓ				
TRAÇO NÍVEL DE RESISTÊNCIA	1 50 MPa	2 65 MPa	3 80 MPa	4 95 MPa
Cimento (Kg)	262,53	314,59	362,20	399,71
Sílica Ativa (Kg)	22,47	26,93	31,00	34,21
Areia Artificial (Kg)	900	854	815	784,00
Pó de pedra (Kg)	108	102,48	97,8	94,08
Brita (Kg)	1053	1054	1053	1054,00
Água (l)	99,75	105,8712	110,096	112,82
Água/aglomerante	0,35	0,31	0,28	0,26
Aditivo (Kg)	4,72	5,33	7,37	7,92
Teor de Argamassa seca (%)	55,12	55,19	55,36	55,45

FONTE: A AUTORA (2014)

Já para os traços com 18% de pó de pedra devido ao alto teor de finos, foi necessário aumentar o teor de superplastificante para 2,1%. A planilha de dosagem está apresentada na TABELA 12. Deve ser notado, nessa tabela, a redução significativa do consumo de cimento em relação aos traços base, em torno de 35%.

TABELA 12: DOSAGEM UTILIZADA NOS TRAÇOS COM 18% DE PÓ

TRAÇO COM 18% DE PÓ				
TRAÇO NÍVEL DE RESISTÊNCIA	1 50 MPa	2 65 MPa	3 80 MPa	4 95 MPa
Cimento (Kg)	212,79	267,39	317,15	356,37
Sílica Ativa (Kg)	18,21	22,89	27,15	30,51
Areia Artificial (Kg)	900	854	815	784,00
Pó de pedra (Kg)	162	153,72	146,7	141,12
Brita (Kg)	1053	1054	1053	1054,00
Água (l)	80,85	89,9868	96,404	100,59
Água/aglomerante	0,35	0,31	0,28	0,26
Aditivo (Kg)	8,25	9,32	10,31	11,09
Teor de Argamassa seca (%)	55,12	55,19	55,36	55,45

FONTE: A AUTORA (2014)

As misturas dos concretos dos experimentos foram feitas com o uso de uma betoneira de eixo inclinado com capacidade de 150 litros, conforma FIGURA 26.



FIGURA 26: BETONEIRA UTILIZADA  
FONTE: A AUTORA (2014)

A determinação da sequência da mistura dos materiais na betoneira foi definida em ensaios pilotos no laboratório variando o momento de adição da água. A sequência foi constante para todos os traços, sendo:

1. 100% de brita e 50% da água, mistura por 30 segundos;

2. 100% da areia e do pó e 25% da água, mistura por 30 segundos;
3. 100% dos aglomerantes (cimento e sílica ativa), mistura por 1 minuto;
4. 100% do aditivo e restante da água, mistura por 10 minutos.

Para cada betonada foram moldados 15 CPs cilíndricos, em formas metálicas de 100mm x 200mm, de acordo com a NBR 5738:2003.

As formas foram lubrificadas com desmoldante e optou-se pelo adensamento do concreto com vibrador de imersão, a fim de garantir a homogeneidade da mistura. Porém, para os concretos produzidos com 18% de pó de pedra o adensamento foi realizado a partir do posicionamento do CP em mesa de vibração (FIGURA 27). Optou-se pela mesa de vibração devido à baixa fluidez do material que impossibilitou a utilização do vibrador de imersão.



FIGURA 27: CORPOS DE PROVA ADENSADO EM MESA VIBRATÓRIA  
FONTE: A AUTORA (2014)

Após a moldagem, os CPs foram cobertos com filme PVC, evitando assim a perda de água do concreto, e mantidos em temperatura ambiente do laboratório por 24h (FIGURA 28).



FIGURA 28: CORPOS DE PROVA COBERTOS COM FILME DE PVC  
FONTE: A AUTORA (2014)

Após as 24 horas, os CPs foram retirados das formas e colocados em câmaras úmidas, como mostrado na FIGURA 29, com umidade relativa superior a 95% e temperaturas de  $23 \pm 2$  °C até a data de ruptura.



FIGURA 29: CORPOS DE PROVA EM CÂMARA ÚMIDA NO LABORATÓRIO  
FONTE: A AUTORA (2014)

Torricon (2010) explica que para evitar a concentração de tensões junto às extremidades dos CPs em virtude das imperfeições que surgem no processo de moldagem, pode-se empregar o capeamento com enxofre para concretos

convencionais. Porém, para o CAR esse processo pode levar a ruptura prematura pela diferença de rigidez do material. Assim, no presente trabalho todas as extremidades dos CPs foram retificadas uma hora antes do ensaio com retifica mecânica apropriada para corpos de prova de concreto, conforme FIGURA 30.



FIGURA 30: RETIFICAÇÃO CORPOS DE PROVA  
FONTE: A AUTORA (2014)

Em seguida, os CPs foram rompidos nas idades determinadas respeitando as tolerâncias de tempo determinadas pela NBR-5739:2007.

Nos ensaios mecânicos foram utilizadas prensas universais eletroeletrônicas, marca EMIC. No ensaio de resistência a compressão o modelo DL 100.000 para 100tf (FIGURA 31) e no ensaio de resistência à tração por compressão diametral modelo DL 30.000 para 30tf (FIGURA 32), ambas calibradas em 29/09/2014. Para a medição da deformação foi utilizado extensômetro marca EMIC (FIGURA 33).





FIGURA 31: ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO NOS CPS DE CAR  
FONTE: A AUTORA (2014)



FIGURA 32: ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL NOS CPS  
FONTE: A AUTORA (2014)



FIGURA 33: MEDIÇÃO DA DEFORMAÇÃO COM EXTENSÔMETRO NOS CPS DE CAR  
FONTE: A AUTORA (2014)

## 5 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados e analisados os resultados obtidos nos ensaios realizados no programa experimental.

### 5.1 ARGAMASSA

#### 5.1.1 Consistência da argamassa

Os resultados dos ensaios da fluidez da argamassa com adição de pó de pedra estão apresentados no ANEXO A e os gráficos com o resultado da média das três medições no Flow Table e no Cone de Kantro nas FIGURAS 34 e 35, respectivamente. Com base nesses dados, realizou-se a análise de variância (ANOVA), com nível de significância de 95%, conforme TABELA 13 e TABELA 14. A influência é significativa se o parâmetro do processo estudado, no caso os teores de pó de pedra e de superplastificante, influenciam na variável de resposta, no caso a consistência da argamassa.

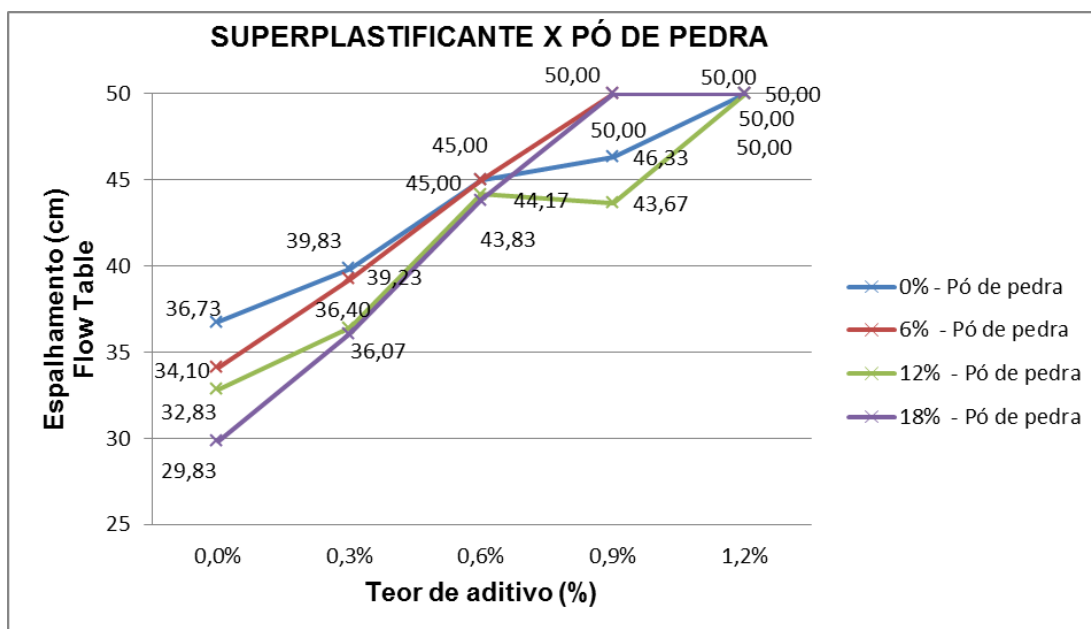


FIGURA 34: % SUPERPLASTIFICANTE X PÓ DE PEDRA: MESA DE CONSISTÊNCIA  
 FONTE: A AUTORA (2014)

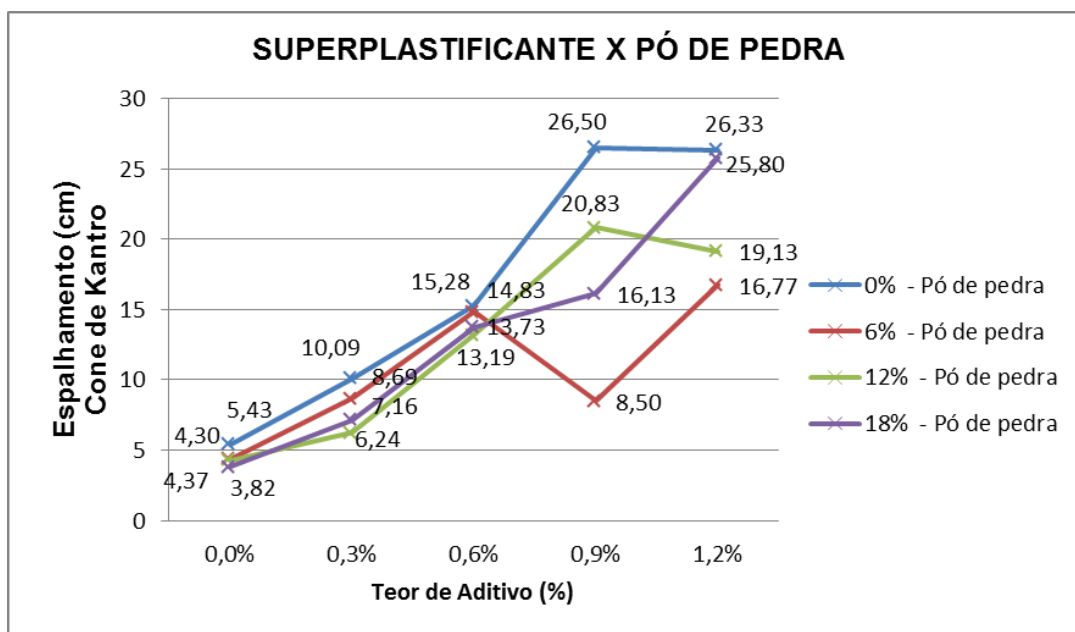


FIGURA 35: % SUPERPLASTIFICANTE X PÓ DE PEDRA: CONE DE KANTRO  
 FONTE: A AUTORA (2014)

TABELA 13: ANOVA PARA COMPATIBILIDADE ADITIVO E FINOS – FLOW TABLE

FONTE	SQ	GDL	MQ	Teste F	F tab	COMPARAÇÃO
% PÓ DE PEDRA (A)	58,84	3	19,61	87,49	2,84	Efeito correspondente é significativo
% SUPERPLASTIFICANTE (B)	2276,57	4	569,14	2538,93	2,61	Efeito correspondente é significativo
AB	137,29	12	11,44	51,04	2,00	Efeito correspondente é significativo
Erro	8,97	40	0,22			
Total	2481,67	59				

SQ: SOMA DE QUADRADOS

GDL: GRAU DE LIBERDADE

MQ: MÉDIAS QUADRADAS

TESTE F: DISTRIBUIÇÃO F DE SNEDECOR

F TAB: VALOR TABELADO DE F DE SNEDECOR

FONTE: A AUTORA (2014)



TABELA 14: ANOVA PARA COMPATIBILIDADE ADITIVO E FINOS – CONE DE KANTRO

FONTE	SQ	GDL	MQ	Teste F	F tab	COMPARAÇÃO
% PÓ DE PEDRA (A)	287,54	3	95,85	36,37	2,84	Efeito correspondente é significativo
% SUPERPLASTIFICANTE (B)	2450,02	4	612,50	232,40	2,61	Efeito correspondente é significativo
AB	479,59	12	39,97	15,16	2,00	Efeito correspondente é significativo
Erro	105,42	40	2,64			
Total	3322,56	59				

SQ: SOMA DE QUADRADOS

GDL: GRAU DE LIBERDADE

MQ: MÉDIAS QUADRADAS

TESTE F: DISTRIBUIÇÃO F DE SNEDECOR

F TAB: VALOR TABELADO DE F DE SNEDECOR

FONTE: A AUTORA (2014)

Os gráficos confirmam a influência da adição de pó de pedra na consistência da argamassa. Conforme pode ser observado nas FIGURA 33 e FIGURA 34, de maneira geral, houve redução no espalhamento das argamassas à medida que se aumentou o teor de pó de pedra, e provavelmente, esse fenômeno está associado à superfície específica do pó de pedra. À medida que a percentagem de pó aumenta, aumenta a sua superfície específica das partículas na mistura, e, seria necessária mais água para molhar as superfícies e, conseqüentemente, diminui a fluidez.

O espalhamento medido no Cone de Kantro com 6% de pó de pedra e 0,9% de aditivo foi exceção à regra. Provavelmente devido a erro de medição, visto que, o mesmo teor no Flow Table resultou em um espalhamento coerente com os demais.

Na FIGURA 33, observa-se que o teor de 1,2% de superplastificante resultou em espalhamentos que atingiram o diâmetro total da mesa, 50 cm, para todos os teores de substituição pelo pó de pedra. Esses resultados possivelmente ocorreram pelo alto teor do superplastificante combinado à eficiência do mesmo. Dessa maneira, para o teor de superplastificante de 1,2%, foi mais confiável o ensaio de Cone de Kantro.

O superplastificante, como esperado, agiu sobre o pó, quanto maior a quantidade, maior a fluidez da argamassa, para maior parte dos casos. Os gráficos demonstram que até o teor de 0,9% de superplastificante o espalhamento das argamassas cresce e a partir do mesmo os valores se estabilizam. Assim, provavelmente o teor de 0,9% está próximo do ponto de saturação do aditivo para a argamassa. Nota-se que as curvas são coerentes em comportamento para teores de superplastificante até 0,6%, sofrendo alterações bruscas a cima desse valor, indicando necessidade de avaliação do comportamento reológico dessas misturas. Numa avaliação preliminar apenas observando as FIGURAS 33 e 34 o cone de Kantro apresenta coerência para argamassas. Não é objetivo deste trabalho analisar essa possibilidade, mas abre-se caminho para pesquisa desse assunto.

Conforme o esperado, a ANOVA apresentou efeito significativo de ambas às fontes de variação, tanto para o Flow Table, como para o cone de Kantro.

A comparação múltipla de médias para fluidez da argamassa com adição de pó de pedra no ensaio Flow Table apresentou diferença significativa para todas as comparações sem superplastificante. Ao adicionar o teor de 0,3% e de 0,6%, apenas as comparações entre 18% e 12% e 6% e 0% de pó apresentaram diferenças não significativas. No teor de 0,9% apenas a comparação entre 18% e 6% apresentou diferença não significativa. Como o teor de 1,2% de superplastificante resultou em espalhamentos que atingiram o diâmetro total da mesa, como destacado anteriormente, não foi possível analisar a diferença estatística dos resultados. Assim, do total de comparações realizadas, apenas 16,70% não apresentou diferença significativa, o que demonstra a grande influência da substituição da areia artificial pelo pó de pedra na consistência das argamassas medidas na mesa de consistência.

A mesma análise foi feita com base nos resultados de fluidez obtidos no ensaio minicone de Kantro. A comparação múltipla de médias, para todos os teores de pó sem superplastificante e com 0,6% de superplastificante, diferente do encontrado com a mesa de consistência, não apresentaram diferenças significativas. Para o teor de 0,3% de superplastificante, 18% e 0% e 12% e 0% de pó apresentaram diferenças significativas. Já para o teor de 0,9% de superplastificante todas as comparações apresentaram diferenças significativas. E para o teor de 1,2% de

superplastificante, foram significativas as comparações entre 18% e 0% e entre 12% e 6%.

### 5.1.2 Resistência à compressão da argamassa

Os resultados das rupturas dos corpos de prova de argamassa estão apresentados no ANEXO D. As resistências médias alcançadas nos ensaios estão apresentadas na FIGURA 36 e a ANOVA para resistência à compressão da argamassa, com nível de significância de 95% está na TABELA 15.

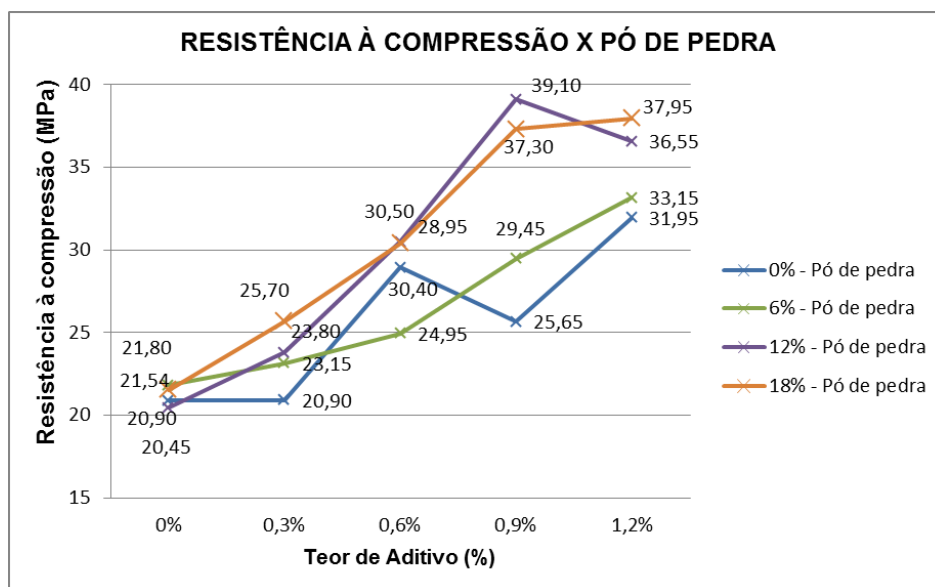


FIGURA 36: RESULTADOS RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO ARGAMASSAS  
FONTE: A AUTORA (2014)

TABELA 15: ANOVA PARA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DA ARGAMASSA

FONTE	SQ	GDL	MQ	Teste F	F tab	COMPARAÇÃO
% PÓ DE PEDRA (A)	199,32	3	66,44	7,24	3,01	Efeito correspondente é significativo
% SUPERPLASTIFICANTE (B)	1076,17	3	358,71	39,09	3,01	Efeito correspondente é significativo
AB	164,43	9	18,27	1,99	2,30	Efeito correspondente não é significativo
Erro	220,22	24	9,18			
Total	1660,13	39				

SQ: SOMA DE QUADRADOS

GDL: GRAU DE LIBERDADE

MQ: MÉDIAS QUADRADAS

TESTE F: DISTRIBUIÇÃO F DE SNEDECOR

F TAB: VALOR TABELADO DE F DE SNEDECOR

FONTE: A AUTORA (2014)

Os resultados apresentados na FIGURA 36 demonstram, de maneira geral, que o aumento da resistência à compressão dos corpos de prova foi diretamente proporcional ao aumento do teor de pó de pedra, ou seja, a adição de pó de pedra em argamassas de cimento Portland aparentemente aumenta a resistência à compressão, até atingir certo limite.

Provavelmente, o aumento da resistência ocorre devido ao efeito microfiller do pó, que pelas suas minúsculas partículas resulta em maior empacotamento dos sólidos. As partículas menores do pó se encaixam nos vazios das partículas maiores dos agregados, preenchendo os poros da argamassa e tornando-os descontínuos, conforme descrito anteriormente. Nelson e Guillot (2006), explicam que a otimização da compacidade do material é realizada, em geral, utilizando-se um material de maior granulometria e outro de menor granulometria em relação ao cimento, como discutido anteriormente.

Ao analisar a caracterização do agregado miúdo (QUADRO 09) observa-se que o índice de vazios do mesmo é de 51%. O traço sem pó de pedra, apresenta o teor de pasta, em média, de 48%, dessa forma com o índice de vazios da argamassa de 3%. Já com 6% de pó de pedra em substituição a areia artificial, o teor de pasta passa a ser, em média, de 51%, reduzindo o índice de vazios. Com 12% de substituição o teor de pasta chega a 54% e observa-se o aumento significativo na resistência à compressão das argamassas. Com 18% de pó de pedra, o teor de pasta é de, em média, 58%, assim, o índice de vazios da areia não importa mais e o efeito de afastamento começa a ocorrer. As partículas com diâmetros menores começam a agir sobre as com diâmetros maiores. Ocorre o teor onde a elevada quantidade de partículas finas adicionada não se ajusta perfeitamente entre as aberturas das partículas maiores, prejudicando a densificação, havendo um aumento do volume de poros e a diminuição da densidade de empacotamento.

Observando apenas os resultados, os valores mais altos alcançados foram com os teores de 12% de substituição da areia artificial por pó de pedra, porém com valores muito próximos a 18%. A partir desse teor o efeito de afastamento começa a acontecer,

A ANOVA provou o efeito significativo do pó de pedra e do superplastificante na resistência da argamassa. A interação, como esperado, não foi significativa, demonstrando que o efeito da interação das variáveis não age na resistência. Isso

ocorre pelas fontes de variação influenciarem os resultados no mesmo sentido. Tanto o superplastificante, quanto o pó de pedra, levam ao aumento da resistência da argamassa.

A comparação múltipla de médias para a resistência à compressão das argamassas apresentou diferença significativa apenas no teor de 0,9% de superplastificante, para as comparações entre 18% e 0%, 12% e 6% e entre 12% e 0%.

## 5.2 PASTA

### 5.2.1 Teor ótimo de superplastificante

Os resultados dos ensaios da fluidez da pasta de cimento com adição de pó de pedra para a determinação do teor ótimo de superplastificante estão apresentados no ANEXO B e os gráficos com o resultado da média das três medições na FIGURA 37. Com base nesses dados, realizou-se a ANOVA, com nível de significância de 95%, conforme TABELA 16.

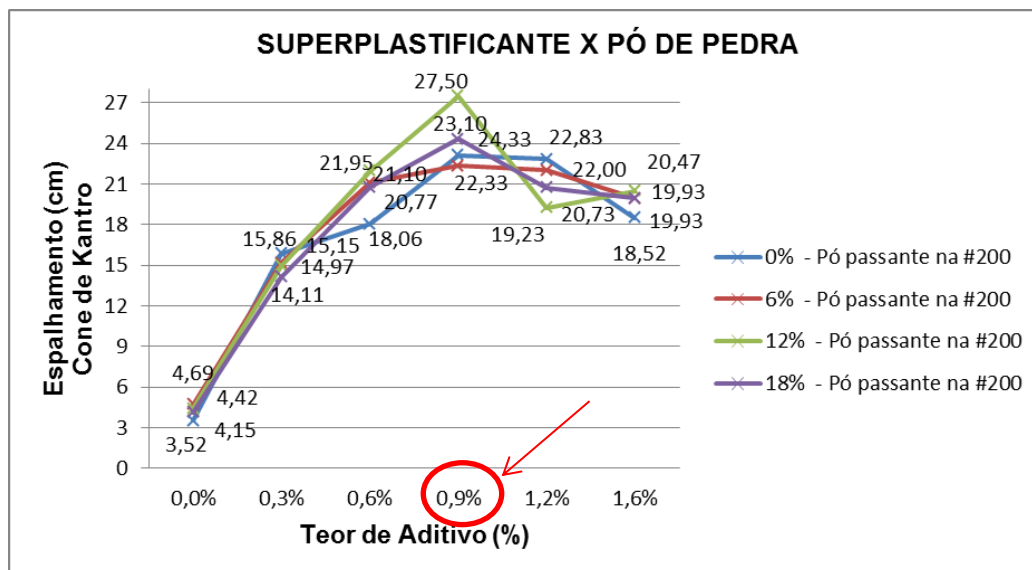


FIGURA 37: TEOR ÓTIMO DE SUPERPLASTIFICANTE  
FONTE: A AUTORA (2014)

TABELA 16: ANOVA PARA TEOR ÓTIMO DE SUPERPLASTIFICANTE

FONTE	SQ	GDL	MQ	Teste F	F tab	COMPARAÇÃO
% PÓ DE PEDRA (A)	11,55	3	3,85	2,99	2,80	Efeito correspondente é significativo
% SUPERPLASTIFICANTE (B)	3084,23	5	616,85	478,56	2,41	Efeito correspondente é significativo
AB	95,91	15	6,39	4,96	1,88	Efeito correspondente é significativo
Erro	61,87	48	1,29			
Total	3253,55	71				

SQ: SOMA DE QUADRADOS

GDL: GRAU DE LIBERDADE

MQ: MÉDIAS QUADRADAS

TESTE F: DISTRIBUIÇÃO F DE SNEDECOR

F TAB: VALOR TABELADO DE F DE SNEDECOR

FONTE: A AUTORA (2014)

A FIGURA 36 demonstra que o espalhamento da pasta aumenta até o teor de 0,9% de superplastificante. A partir desse valor os resultados diminuem. Provavelmente, nesse ponto o superplastificante está próximo do ponto de saturação, a partir de cerca de 0,9% o aditivo não proporcionará mais o efeito na dispersão das partículas.

Com base nesses dados, realizou-se a ANOVA, conforme TABELA 16, a qual provou novamente o efeito significativo do pó de pedra, do superplastificante e da interação.

Na comparação múltipla de médias, ao comparar os resultados para todos os teores de pó de pedra obtidos com 0%, 0,3%, e 1,6% de superplastificante, os resultados não deram significativos. Para 0,6% de superplastificante deram significativas as comparações entre 18% e 0% de pó, entre 12% e 0% e entre 6% e 0%. Para 0,9%, valor definido como próximo do ponto de saturação do aditivo, só não foram significativas as comparações entre 18% e 0% e entre 6% e 0%.

### 5.2.2 Efeito do peneiramento do pó de pedra

Os resultados da consistência da pasta de cimento produzida com o pó de pedra sem peneiramento na #200 em laboratório estão apresentados no ANEXO C e as médias graficamente na FIGURA 38.

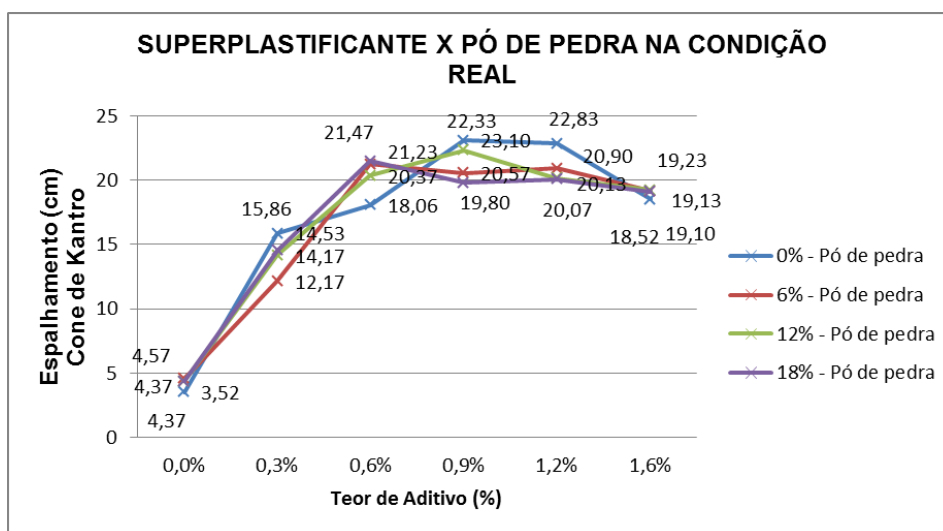


FIGURA 38: CONSISTÊNCIA DA PASTA DE CIMENTO PRODUZIDA COM PÓ DE PEDRA NA CONDIÇÃO REAL  
 FONTE: A AUTORA (2014)

Os resultados demonstram que a perda de consistência da pasta de cimento com o pó de pedra sem passar pelo peneiramento na #200 em laboratório, em relação à consistência da pasta com o pó passante na #200 foi mínima. A média da perda de consistência foi de 3,63%, dessa maneira possibilitando a utilização do pó de pedra sem a necessidade de peneiramento em laboratório, considerando o material na condição real, como encontrado nas pedreiras. A FIGURA 39 compara os gráficos dos resultados obtidos com a pasta produzida com o pó passante na #200 e com o pó na condição real, demonstrando a similaridade dos resultados.

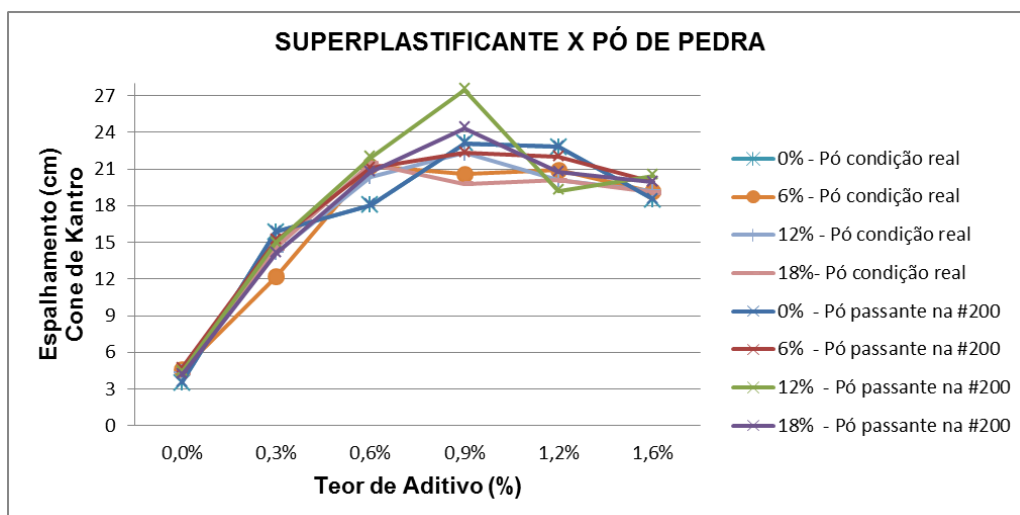


FIGURA 39: CONSISTÊNCIA DA PASTA DE CIMENTO PRODUZIDA COM PÓ DE PEDRA NA CONDIÇÃO REAL X CONSISTÊNCIA DA PASTA DE CIMENTO PRODUZIDA COM PÓ DE PEDRA PASSANTE NA #200

FONTE: A AUTORA (2014)

A fim de comparar estatisticamente as conclusões anteriores, com os resultados obtidos nos ensaios da fluidez da pasta de cimento com adição de pó de pedra peneirado na #200 em laboratório (5.2.1) e com os resultados do mesmo ensaio realizado com o pó sem peneiramento na #200 em laboratório, realizou-se a ANOVA, com nível de significância de 95%, conforme TABELA 17.

TABELA 17: ANÁLISE DE VARIÂNCIA PARA EFEITO DO PENEIRAMENTO NA #200 EM LABORATÓRIO

FONTE	SQ	GDL	MQ	Teste F	F tab	COMPARAÇÃO
% PÓ DE PEDRA (A)	12,65	3	4,22	0,01	3,01	Efeito correspondente não é significativo
% SUPERPLASTIFICANTE (B)	1890,87	5	378,17	0,65	2,62	Efeito correspondente não é significativo
AB	81,23	15	5,42	0,01	2,11	Efeito correspondente não é significativo
Erro	14010,27	24	583,76			
Total	15995,03	47				

SQ: SOMA DE QUADRADOS

GDL: GRAU DE LIBERDADE

MQ: MÉDIAS QUADRADAS

TESTE F: DISTRIBUIÇÃO F DE SNEDECOR

F TAB: VALOR TABELADO DE F DE SNEDECOR

FONTE: A AUTORA (2014)



A partir da TABELA 17, que apresentou efeito não significativo para todas as fontes de variação, comprova-se estatisticamente as conclusões anteriores.

### 5.3 CONCRETO DE ALTA RESISTÊNCIA

Os dados obtidos nos ensaios mecânicos encontram-se nos ANEXO E, ANEXO F, ANEXO G e ANEXO H, os resultados e a análise de cada ensaio estão apresentados a seguir.

#### 5.3.1 Resistência à compressão axial

A TABELA 18 apresenta os resultados obtidos para a resistência à compressão de todos concretos produzidos, na idade correspondente.

TABELA 18: RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DOS CONCRETOS (MPa)

% PÓ DE PEDRA (A)	NÍVEL DE RESISTÊNCIA											
	50MPa			65MPa			80MPa			95MPa		
	IDADE (DIAS)			IDADE (DIAS)			IDADE (DIAS)			IDADE (DIAS)		
	3	7	28	3	7	28	3	7	28	3	7	28
0	41,3	51,7	48	46	59,5	57,3	58	65,1	74,5	63,7	69,3	76
	41,4	50,6	52,3	49	54,9	69	54	63,2	63,3	65,6	74,2	83
	39,20	50,50	54,40	47,10	58,40	61,20	49,40	61,20	64,80	66,3	80,7	79,8
<b>MÉDIA</b>	<b>40,63</b>	<b>50,93</b>	<b>51,57</b>	<b>47,37</b>	<b>57,60</b>	<b>62,50</b>	<b>53,80</b>	<b>63,17</b>	<b>67,53</b>	<b>65,20</b>	<b>74,73</b>	<b>79,60</b>
<b>DP</b>	<b>1,24</b>	<b>0,67</b>	<b>3,26</b>	<b>1,52</b>	<b>2,40</b>	<b>5,96</b>	<b>4,30</b>	<b>1,95</b>	<b>6,08</b>	<b>1,35</b>	<b>5,72</b>	<b>3,50</b>
<b>CV (%)</b>	<b>3,06%</b>	<b>1,31%</b>	<b>6,33%</b>	<b>3,20%</b>	<b>4,17%</b>	<b>9,53%</b>	<b>8,00%</b>	<b>3,09%</b>	<b>9,00%</b>	<b>2,06%</b>	<b>7,65%</b>	<b>4,40%</b>
6	40,1	60,7	59	49,9	69,6	74,4	61,4	62,5	79,2	61,2	65,9	44,5
	38,5	59,2	56,8	57	68,4	72,5	62,9	76,8	73,8	60,3	67,7	87,8
	43,00	54,70	56,70	49,60	72,00	65,90	55,30	82,20	66,10	60,1	65,7	69,1
<b>MÉDIA</b>	<b>40,53</b>	<b>58,20</b>	<b>57,50</b>	<b>52,17</b>	<b>70,00</b>	<b>70,93</b>	<b>59,87</b>	<b>73,83</b>	<b>73,03</b>	<b>60,53</b>	<b>66,43</b>	<b>67,13</b>
<b>DP</b>	<b>2,28</b>	<b>3,12</b>	<b>1,30</b>	<b>4,19</b>	<b>1,83</b>	<b>4,46</b>	<b>4,03</b>	<b>10,18</b>	<b>6,58</b>	<b>0,59</b>	<b>1,10</b>	<b>21,72</b>
<b>CV (%)</b>	<b>5,63%</b>	<b>5,37%</b>	<b>2,26%</b>	<b>8,03%</b>	<b>2,62%</b>	<b>6,29%</b>	<b>6,72%</b>	<b>13,79%</b>	<b>9,01%</b>	<b>0,97%</b>	<b>1,66%</b>	<b>32,35%</b>
12	58,4	51,5	60,6	57,4	70,8	69,4	53,7	67,1	58,6	49,4	77,5	76,6
	47,4	62,9	79,3	54	71,3	78	62,3	57,2	70,2	66,7	82,8	88,1
	49,10	59,40	60,50	53,20	73,90	86,10	52,90	54,90	68,50	56,6	75,7	56,1
<b>MÉDIA</b>	<b>51,63</b>	<b>57,93</b>	<b>66,80</b>	<b>54,87</b>	<b>72,00</b>	<b>77,83</b>	<b>56,30</b>	<b>59,73</b>	<b>65,77</b>	<b>57,57</b>	<b>78,67</b>	<b>73,60</b>
<b>DP</b>	<b>5,92</b>	<b>5,84</b>	<b>10,83</b>	<b>2,23</b>	<b>1,66</b>	<b>8,35</b>	<b>5,21</b>	<b>6,48</b>	<b>6,26</b>	<b>8,69</b>	<b>3,69</b>	<b>16,21</b>
<b>CV (%)</b>	<b>11,47%</b>	<b>10,08%</b>	<b>16,21%</b>	<b>4,06%</b>	<b>2,31%</b>	<b>10,73%</b>	<b>9,26%</b>	<b>10,85%</b>	<b>9,53%</b>	<b>15,10%</b>	<b>4,69%</b>	<b>22,02%</b>
18	39,5	51,2	55,4	52,7	49	61	47,5	58,8	72,3	51,8	63,3	67,8
	41,2	48,4	51,9	42,7	56,2	69,9	40,3	53,6	67,8	51,8	63,6	61,6
	40,70	47,70	61,50	40,50	57,10	55,50	51	65,2	62,9	54,1	65,5	72,5
<b>MÉDIA</b>	<b>40,47</b>	<b>49,10</b>	<b>56,27</b>	<b>45,30</b>	<b>54,10</b>	<b>62,13</b>	<b>46,27</b>	<b>59,20</b>	<b>67,67</b>	<b>52,57</b>	<b>64,13</b>	<b>67,30</b>
<b>Dpad</b>	<b>0,87</b>	<b>1,85</b>	<b>4,86</b>	<b>6,50</b>	<b>4,44</b>	<b>7,27</b>	<b>5,46</b>	<b>5,81</b>	<b>4,70</b>	<b>1,33</b>	<b>1,19</b>	<b>5,47</b>
<b>CV (%)</b>	<b>2,16%</b>	<b>3,77%</b>	<b>8,63%</b>	<b>14,35%</b>	<b>8,21%</b>	<b>11,70%</b>	<b>11,79%</b>	<b>9,81%</b>	<b>6,95%</b>	<b>2,53%</b>	<b>1,86%</b>	<b>8,12%</b>

DP: DESVIO PADRÃO

CV: COEFICIENTE DE VARIAÇÃO

FONTE: A AUTORA (2014)

Cabe observar que dentre os três valores obtidos aos 28 dias com a relação A/A de 0,26 com substituição de 6% do cimento Portland pelo pó de pedra, o resultado obtido na ruptura de um dos corpos de prova, 44,5 MPa, foi quase 60% inferior à média dos demais. O mesmo ocorreu com 12% de substituição para a relação A/A de 0,26. O valor 56,1MPa foi quase 70% inferior a média dos demais. Esses dois resultados levaram ao elevado coeficiente de variação obtido nas amostras, 32,35% e 22,02%, respectivamente. Provavelmente essa diferença ocorreu por problemas na moldagem dos CPs, inadequada vibração, ou no momento de preparação dos topos dos corpos de prova, já que os corpos de prova rompidos foram moldados de uma mesma betonada. Assim, esses dois resultados foram eliminados da análise de variância (ANOVA). Segundo Bianchini (2010), o CAR apresenta maiores variações entre os resultados obtidos com CPs moldados de um mesmo concreto do que moldados com concretos usuais. Isso ocorre devido à grande influência dos processos de ensaio. Pequenas variações nestes provocam grandes variações nos resultados de resistência à compressão, sendo de grande dificuldade a repetição dos máximos valores obtidos.

A partir dos dados obtidos na TABELA 18, observa-se que no primeiro e segundo nível de resistência, 50MPa e 65MPa, os resultados alcançaram os níveis de resistência à compressão alvos. Já no terceiro e quarto nível de resistência, 80MPa e 90MPa, os resultados não alcançaram as faixas de resistência determinadas pelo método de dosagem. Esses resultados podem ser decorrentes das baixas relações A/A combinadas à utilização da areia artificial e do pó de pedra que levou a uma quantidade excessiva de pó, que conseqüentemente necessitaria de alta demanda de água.

A ANOVA, com nível de significância de 95%, realizada com base nos dados de resistência à compressão é apresentada na TABELA 19.

TABELA 19: ANÁLISE DE VARIÂNCIA PARA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL

<b>FONTE</b>	<b>SQ</b>	<b>GDL</b>	<b>MQ</b>	<b>Teste F</b>	<b>F tab</b>	<b>COMPARAÇÃO</b>
<b>% PÓ DE PEDRA (A)</b>	1796,76	3	598,92	7,66	2,68	Efeito correspondente é significativo
<b>RELAÇÃO A/A (B)</b>	4889,28	3	1629,76	20,83	2,68	Efeito correspondente é significativo
<b>AB</b>	1519,22	9	168,80	2,16	1,95	Efeito correspondente é significativo
<b>Erro</b>	9856,80	126	78,23			
<b>Total</b>	18062,06	141				

SQ: SOMA DE QUADRADOS

GDL: GRAU DE LIBERDADE

MQ: MÉDIAS QUADRADAS

TESTE F: DISTRIBUIÇÃO F DE SNEDECOR

F TAB: VALOR TABELADO DE F DE SNEDECOR

FONTE: A AUTORA (2014)

De acordo com a ANOVA, verifica-se a influência da relação A/A na resistência à compressão dos concretos estudados, como o esperado, a menor quantidade de água reduz os poros do concreto e aumenta a resistência à compressão. A análise ainda comprovou a influência da substituição do cimento Portland pelo pó de pedra na resistência dos concretos estudados, da mesma forma que os resultados encontrados na argamassa, e, em menor escala, o efeito da interação das fontes de variação.

No CAR, o cimento Portland foi substituído parcialmente pelo pó de pedra. Ao analisar os diâmetros médios dos dois materiais, QUADRO 08 e QUADRO 11, observa-se que o do cimento Portland é menor que o do pó de pedra. Porém, ao analisar a distribuição granulométrica do pó, FIGURA 19, percebe-se uma faixa de material com granulometria muito baixa, ou seja, muito fino, decorre dessa faixa o aumento na resistência mecânica. As partículas menores do pó se encaixam nos vazios das partículas maiores dos agregados, preenchendo os poros da argamassa e tornando-os descontínuos, conforme descrito anteriormente.

A FIGURA 40 apresenta as resistências do exemplar à compressão aos 28 dias para de cada teor de pó para as relações A/A estudadas.

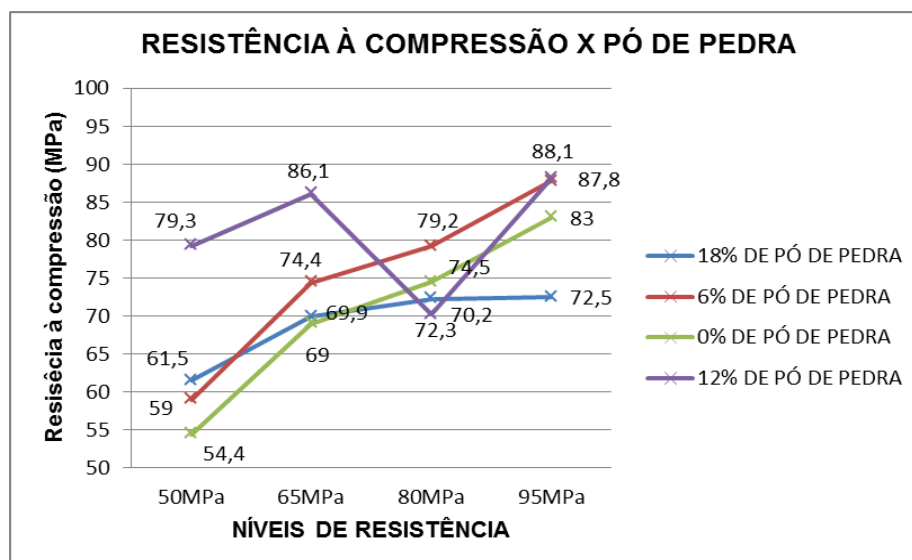


FIGURA 40: RELAÇÃO ENTRE AS RESISTÊNCIAS À COMPRESSÃO (MPa) PARA AS RELAÇÕES A/AGLOMERANTE  
 FONTE: A AUTORA (2014)

Na FIGURA 40, observa-se que os resultados tendem a melhorar com a substituição do cimento Portland pelo pó de pedra, indicando que os melhores resultados são com 12% de substituição. Apenas no terceiro nível de resistência, 80MPa, o maior valor obtido não foi com 12% de substituição. Nesse traço, possivelmente ocorreu um excesso de finos que demandou muita água. Como a quantidade de água nesse traço é bastante reduzida, ocorreu uma redução na resistência à compressão. Acima disso, o efeito de afastamento começa a acontecer, da mesma forma nos resultados encontrados para as resistências à compressão das argamassas.

Na comparação múltipla de médias, apresentou diferença significativa apenas a comparação entre 12% e 0% no primeiro nível de resistência. No segundo nível de resistência, 0,31, apresentam diferenças significativas as comparações entre 12% e 0% e 18% e 12% e para o quarto nível, entre 18% e 12%. Assim, em uma análise estatística geral para a resistência à compressão média aos 28 dias, 83% das comparações não apresentaram diferenças significativas, o que demonstra que, apesar das resistências mecânicas mostrarem uma tendência de melhoria com a substituição do cimento Portland pelo pó de pedra, FIGURA 40, a maior parte dos resultados apresentaram-se iguais.

A TABELA 20 resume os resultados obtidos do exemplar da resistência à compressão aos 28 dias e compara com os valores da pesquisa realizada por Mendes (2000).

TABELA 20: RESUMO DOS RESULTADOS DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DOS CONCRETOS (MPa) E COMPARAÇÃO COM A BIBLIOGRAFIA

COMPARAÇÃO RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AOS 28 DIAS					
NÍVEL DE RESISTÊNCIA	MENDES COM CALCÁRIO (2002)	EXPERIMENTOS			
		0% DE PÓ DE PEDRA	6% DE PÓ DE PEDRA	12% DE PÓ DE PEDRA	18% DE PÓ DE PEDRA
50MPa	74,8	54,4	59	79,3	61,5
65MPa	80,3	69	74,4	86,1	69,9
80MPa	86,6	74,5	79,2	70,2	72,3
95MPa	91,8	83	87,8	88,1	72,5

FONTE: A AUTORA (2014)

Ao comparar os resultados obtidos com os de Mendes (2002), percebe-se a redução das resistências à compressão. Essa redução está relacionada com o tipo de preparação dos topos dos corpos de prova. Mendes (2002) utilizou um torno de desgaste retificador, que garantiu alta resistência, fato que já havia sido detectado por Freitas (2005), porém, o equipamento não está mais disponível. Além disso, como destacado anteriormente, o CAR apresenta maiores variações entre os resultados obtidos, sendo de grande dificuldade a repetição dos máximos valores utilizando materiais diferentes.

Os resultados demonstram o acréscimo de resistência diretamente proporcional ao acréscimo de substituição do cimento Portland no primeiro e segundo níveis de resistências, 50MPa e 65MPa, respectivamente. Esses resultados ocorreram pelo efeito microfíler do pó. Segundo Aïtcin (2000) as partículas finas diminuem a exsudação interna e superficial da mistura, gerando zonas de transição com porosidade reduzida. Porém, no segundo e terceiro níveis de resistência, da mesma forma que observado no resultados de todos concretos produzidos (TABELA 18), os resultados não alcançaram as faixas de resistência determinadas pelo método de dosagem, como explicado anteriormente.

Ao analisar os resultados do presente trabalho, em 75% dos resultados a maior resistência obtida foi com a substituição de 12%, como observado na comparação entre as resistências médias. A partir desse valor os resultados já começaram a declinar, provavelmente devido ao efeito de afastamento dos grãos, já mencionado.

Outro aspecto importante a ser analisado é a evolução da resistência à compressão dos concretos produzidos. A FIGURA 41 apresenta a relação entre as resistências à compressão média de 3 CPs e a idade para as quatro relações A/A para o concreto base, sem a adição de pó de pedra.

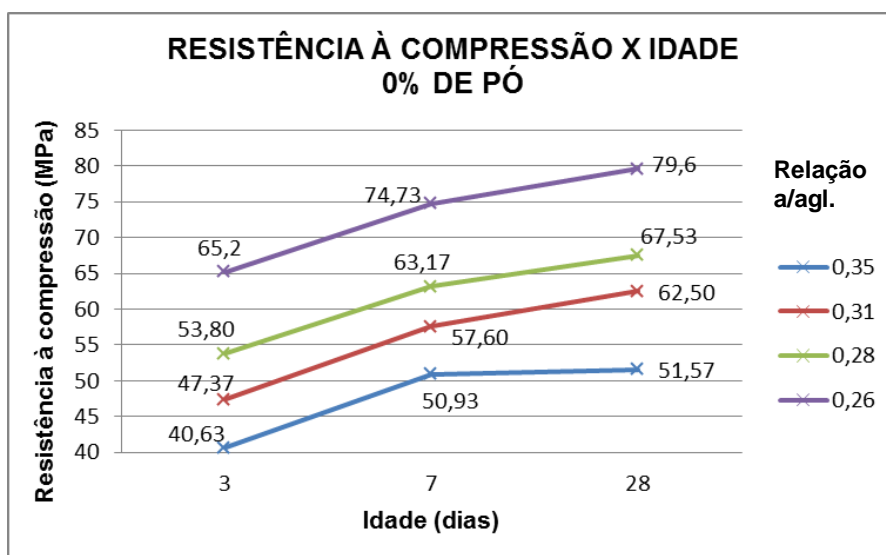


FIGURA 41: RELAÇÃO ENTRE A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (MPa) PARA AS RELAÇÕES A/AGLOMERANTE ENSAIADAS COM 0% DE PÓ DE PEDRA  
FONTE: A AUTORA (2014)

Observa-se na FIGURA 41, que, como esperado, a resistência à compressão do concreto evoluiu com o tempo. De forma geral, a resistência do concreto aumenta com a idade, uma vez que as partículas não hidratadas de cimento continuam a formar produtos de hidratação, que tendem a reduzir o tamanho e o volume total de vazios (AÏTCIN, 2000; NEVILLE, 1997). A hidratação do cimento é basicamente uma sequência de reações químicas entre este componente e a água, obtendo como resultado a perda da consistência, a pega, o endurecimento e o desenvolvimento da resistência da pasta de cimento.

O efeito da idade se dá principalmente pela dependência entre a resistência e a quantidade de vazios na pasta de cimento. O tempo de hidratação do cimento se dá pela idade e tipo do mesmo. Para o presente trabalho, foi utilizado CP V – ARI, garantindo assim alta resistência inicial do cimento (NEVILLE, 1997).

A resistência aos 7 dias foi em média 21% maior que aos 3 dias e aos 28 dias em média 27% maior que aos 3 dias. Já em relação aos 7 dias, a resistência a compressão aos 28 dias foi levemente superior (menos de 10%).

A FIGURA 42 apresenta a relação entre as resistências à compressão médias e a idade dos corpos de provas para as quatro relações A/A para o concreto com 6% de adição de pó de pedra.

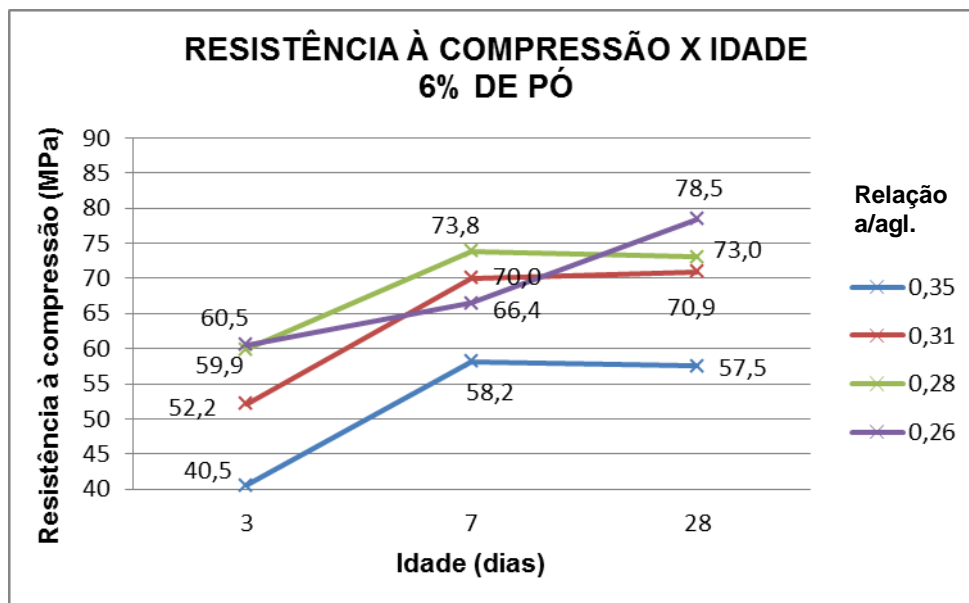


FIGURA 42: RELAÇÃO ENTRE A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (MPa) PARA AS RELAÇÕES A/AGLOMERANTE ENSAIADAS COM 6% DE PÓ DE PEDRA  
FONTE: A AUTORA (2014)

A FIGURA 42 demonstra que a evolução dos 3 aos 7 dias das resistências com 6% de pó de pedra cresceu com a idade, como era o esperado devido à hidratação do cimento. O crescimento foi um pouco superior ao obtido no concreto sem pó de pedra, sendo a resistência aos 7 dias em média 28% maior que aos 3 dias e aos 28 dias em média 33% maior que aos 3 dias. Já em relação aos 7 dias, a resistência a compressão aos 28 dias foi em média levemente superior (menos que 10% superior).

Porém, a resistência à compressão média aos 28 dias foi um pouco inferior que aos 7 dias para as relações A/A de 0,28 e 0,35, o que já havia sido observado na análise feita a partir dos resultados (TABELA 17). Isso ocorreu provavelmente devido a problemas na produção do concreto ou no ensaio, já que os CPs foram moldados da mesma betonada e mantidos nas mesmas condições até a ruptura. Apenas um dos CPs obteve resistência bem inferior que os demais, o que demonstra que o fator de ruído foi no momento de moldagem das amostras.

A FIGURA 43 apresenta a relação entre as resistências à compressão e a idade dos corpos de provas para as diversas relações A/A para o concreto com 12% de adição de pó de pedra.

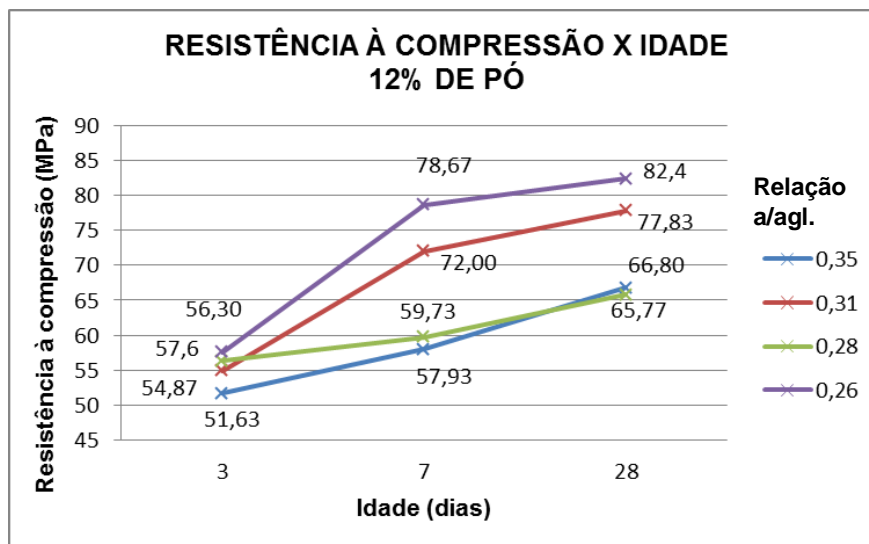


FIGURA 43: RELAÇÃO ENTRE A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (MPa) PARA AS RELAÇÕES A/AGLOMERANTE ENSAIADAS COM 12% DE PÓ DE PEDRA  
FONTE: A AUTORA (2014)

Com 12% de pó de pedra em substituição ao aglomerante houve um ganho de resistência à compressão com a idade para os quatro níveis de resistência estudados.

A evolução das resistências se comportou com valores médios muito próximos a evolução do concreto base, sem pó de pedra.

A FIGURA 44 apresenta a relação entre as resistências à compressão e a idade dos corpos de provas para as diversas relações A/A para o concreto com 18% de adição de pó de pedra.



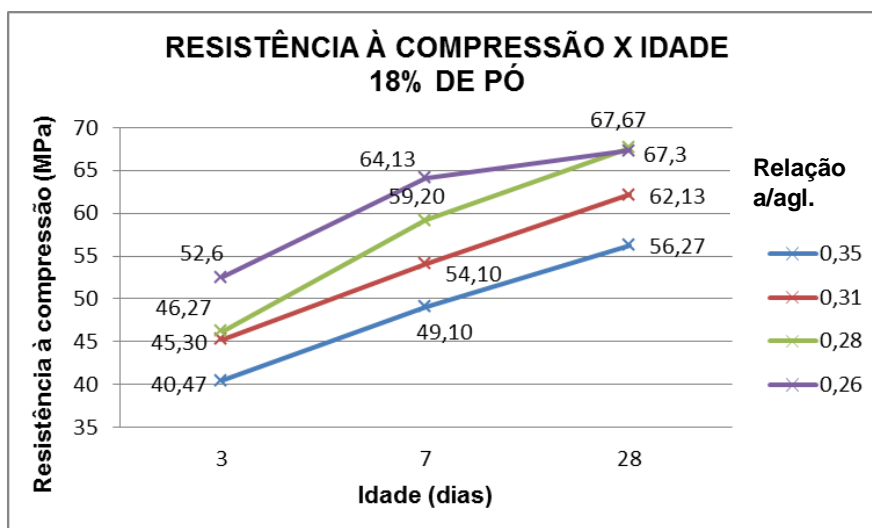


FIGURA 44: RELAÇÃO ENTRE A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (MPa) PARA AS RELAÇÕES A/AGLOMERANTE ENSAIADAS COM 18% DE PÓ DE PEDRA  
FONTE: A AUTORA (2014)

A resistência à compressão dos concretos produzidos com 18% de pó evoluiu com a idade para todos os casos, devido à redução do teor de vazios. Os ganhos de resistência foram mais significativos para esse teor de substituição do que para os outros. A resistência aos 7 dias foi em média 23% maior que aos 3 dias, quase 40% maior aos 28 dias, em relação aos 3 dias, e mais de 12% maior em relação aos 7 dias.

Através dos resultados obtidos de resistências à compressão média aos 3, 7 e 28 dias para cada relação A/A, determinaram-se as equações de regressão das curvas que representaram a tendência dos resultados para cada teor de pó de pedra. Foi calculado também o coeficiente de determinação de cada equação das curvas de tendência ( $R^2$ ), que indica o percentual da variabilidade do modelo de regressão. A TABELA 21 resume os resultados, sendo y a resistência a compressão e x a relação A/A.

TABELA 21: EQUAÇÕES DE REGRESSÃO E  $R^2$  PARA OS VALORES MÉDIOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

IDADE (DIAS)	%PÓ DE PEDRA	EQUAÇÕES	$R^2$
3	0	$Y = 8,0157x^{-1,529}$	0,9696
3	6	$Y = 9,76x^{-1,392}$	0,925
3	12	$Y = 35,576x^{-0,361}$	0,9742
3	18	$Y = 17,465x^{-0,8}$	0,9203
7	0	$Y = 13,853x^{-1,225}$	0,9571
7	6	$Y = 21,043x^{-0,988}$	0,9104
7	12	$Y = 17,838x^{-0,9072}$	0,9072
7	18	$Y = 19,169x^{-0,891}$	0,996
28	0	$Y = 12,17x^{-1,378}$	0,9731
28	6	$Y = 21,043x^{-0,988}$	0,9104
28	12	$Y = 43,035x^{-0,435}$	0,2534
28	18	$Y = 29,0485x^{-0,642}$	0,9288

$R^2$ : COEFICIENTE DE DETERMINAÇÃO

FONTE: A AUTORA (2014)

Os resultados de coeficiente de determinação obtidos no presente trabalho apresentaram bons ajustes das curvas, com exceção da curva obtida com 12% de pó de pedra aos 28 dias.

O resultado encontrado com 12% aos 28 dias apresentou resistência à compressão com relação A/A de 0,28 inferior as obtidas com as relações A/A 0,35 e 0,31, fato que levou a picos de resistências em pontos intermediários da curva. Segundo Ribeiro e Caten (2003), alguns dados coletados podem ser muito influenciados por fatores externos ao estudo. Quando há desconfiança da presença destes dados, ou seja, quando o resíduo for muito elevado, ( $R^2 < 0,3$ ), deve-se verificar a procedência dos mesmos e caso sejam valores realmente atípicos, deverão ser retirados e uma nova regressão deve ser feita. Dessa forma, a equação com 12% de pó aos 28 dias foi ajustada, retirando o valor de resistência à compressão média aos 28 dias atípico (65,80MPa) e obtendo assim a nova equação e  $R^2$ , conforme TABELA 22.

TABELA 22: EQUAÇÕES DE REGRESSÃO E  $R^2$  AJUSTADOS PARA OS VALORES MÉDIOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AOS 28 DIAS COM 12% DE PÓ DE PEDRA

IDADE (DIAS)	%PÓ DE PEDRA	EQUAÇÕES	$R^2$
28	12	$Y = 33,705x^{-0,6777}$	0,8723

$R^2$ : COEFICIENTE DE DETERMINAÇÃO

FONTE: A AUTORA (2014)

Cabe destacar que os demais resultados, e o ajustado, foram semelhantes aos obtidos por Mendes (2002) que foram entre 0,8377 e 0,9997.

### 5.3.2 Resistência à tração por compressão diametral

Os resultados obtidos para a resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias estão apresentados na TABELA 23 e graficamente na FIGURA 45.

TABELA 23: RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL DOS CONCRETOS (MPa)

% PÓ DE PEDRA (A)	NÍVEL DE RESISTÊNCIA - RELAÇÃO A/A											
	0,35			0,31			0,28			0,26		
0	5,91	5,68	6,00	6,38	6,27	6,65	5,55	5,15	6,90	6,46	7,41	7,60
<b>MÉDIA</b>	<b>5,86</b>			<b>6,43</b>			<b>5,87</b>			<b>7,16</b>		
<b>DP</b>	<b>0,17</b>			<b>0,20</b>			<b>0,92</b>			<b>0,61</b>		
<b>CV (%)</b>	<b>2,81%</b>			<b>3,04%</b>			<b>15,63%</b>			<b>8,53%</b>		
6	4,70	6,16	5,20	7,81	7,19	6,95	5,80	7,51	6,86	7,60	5,16	7,92
<b>MÉDIA</b>	<b>5,35</b>			<b>7,32</b>			<b>6,72</b>			<b>6,89</b>		
<b>DP</b>	<b>0,74</b>			<b>0,44</b>			<b>0,86</b>			<b>1,51</b>		
<b>CV (%)</b>	<b>13,86%</b>			<b>6,07%</b>			<b>12,84%</b>			<b>21,90%</b>		
12	7,39	6,69	7,29	8,24	7,46	8,06	7,45	5,44	6,90	7,28	7,14	7,87
<b>MÉDIA</b>	<b>7,12</b>			<b>7,92</b>			<b>6,60</b>			<b>7,43</b>		
<b>DP</b>	<b>0,38</b>			<b>0,41</b>			<b>1,04</b>			<b>0,39</b>		
<b>CV (%)</b>	<b>5,31%</b>			<b>5,16%</b>			<b>15,75%</b>			<b>5,21%</b>		
18	6,80	4,27	6,74	6,60	7,64	4,84	6,59	5,87	6,56	7,86	5,77	6,35
<b>MÉDIA</b>	<b>5,94</b>			<b>6,36</b>			<b>6,34</b>			<b>6,66</b>		
<b>DP</b>	<b>1,44</b>			<b>1,42</b>			<b>0,41</b>			<b>1,08</b>		
<b>CV (%)</b>	<b>24,32%</b>			<b>22,25%</b>			<b>6,42%</b>			<b>16,20%</b>		

DP: DESVIO PADRÃO

CV: COEFICIENTE DE VARIAÇÃO

FONTE: A AUTORA (2014)

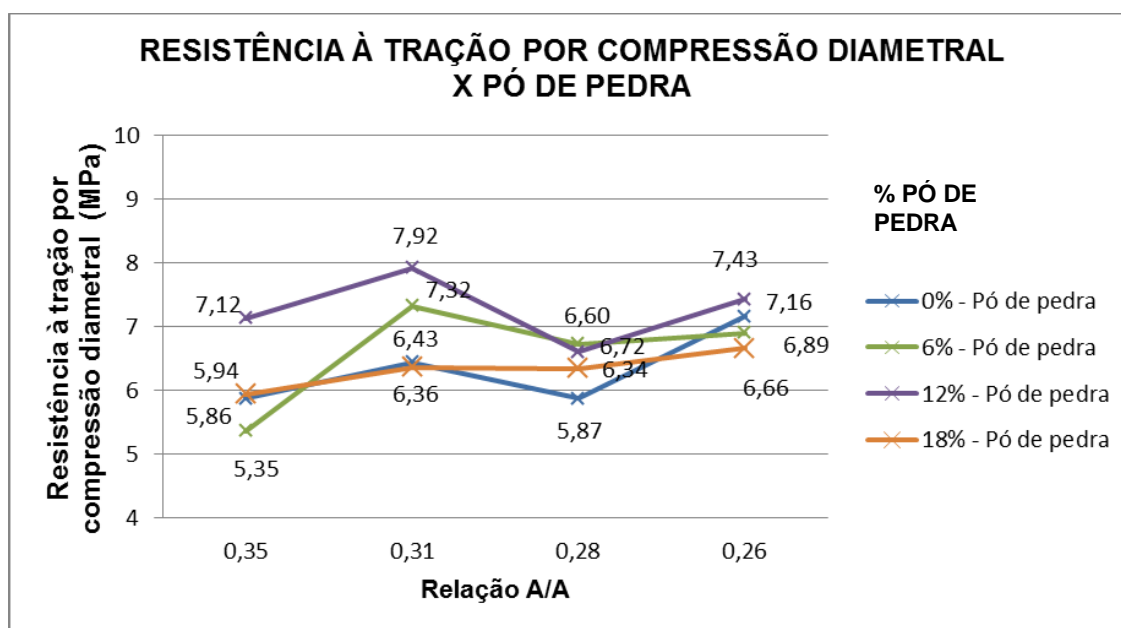


FIGURA 45: RESISTÊNCIAS À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL (MPa) PARA AS RELAÇÕES A/AGLOMERANTE ENSAIADAS

FONTE: A AUTORA (2014)

A ANOVA, com nível de significância de 95%, realizada com base nos dados de resistência à tração por compressão diametral está apresentada na TABELA 24.

TABELA 24: ANÁLISE DE VARIÂNCIA PARA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

FONTE	SQ	GDL	MQ	Teste F	F tab	COMPARAÇÃO
% PÓ DE PEDRA (A)	7,12	3	2,37	3,16	2,90	Efeito correspondente é significativo
RELAÇÃO A/A (B)	8,19	3	2,73	3,64	2,90	Efeito correspondente é significativo
AB	5,25	9	0,58	0,78	2,19	Efeito correspondente não é significativo
Erro	24,01	32	0,75			
Total	44,57	47				

SQ: SOMA DE QUADRADOS

GDL: GRAU DE LIBERDADE

MQ: MÉDIAS QUADRADAS

TESTE F: DISTRIBUIÇÃO F DE SNEDECOR

F TAB: VALOR TABELADO DE F DE SNEDECOR

FONTE: A AUTORA (2014)

A partir da FIGURA 46, observa-se que os maiores resultados obtidos foram com 12% de substituição do cimento Portland pelo pó de pedra e a partir desse teor, novamente foi comprovado o efeito de afastamento dos grãos.

De acordo com a TABELA 24, verifica-se a influência da relação A/A e a influencia da substituição do cimento Portland pelo pó de pedra na resistência à tração por compressão diametral dos concretos estudados. Porém, observa-se que esse ganho de resistência já é bastante inferior ao ganho na resistência à compressão. Já o efeito da interação das fontes não foi significativo.

Na comparação múltipla de médias, apenas as comparações entre 12% e 6% no primeiro nível de resistência, A/A de 0,35, e 18% e 12% no segundo nível de resistência, A/A de 0,31, apresentaram diferenças significativas. Dessa forma, 92% das comparações não apresentaram diferença significativa para a resistência à tração por compressão diametral para os níveis de substituição do cimento Portland

pelo pó de pedra e para as classes de resistência estudadas, ou seja, a maior parte dos resultados apresentam-se iguais.

A TABELA 25 resume os resultados obtidos do exemplar da resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias e compara com os valores da pesquisa realizada por Mendes (2000).

TABELA 25: RESUMO DOS RESULTADOS DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL DOS CONCRETOS (MPa) E COMPARAÇÃO COM A BIBLIOGRAFIA

RESISTÊNCIAS À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL AOS 28 DIAS					
RELAÇÃO A/AGL	MENDES COM CALCÁRIO (2002)	EXPERIMENTOS			
		0% DE PÓ DE PEDRA	6% DE PÓ DE PEDRA	12% DE PÓ DE PEDRA	18% DE PÓ DE PEDRA
0,37 a 0,35	5,1	6	6,16	7,39	6,8
0,32 a 0,31	5,5	6,65	7,81	8,24	7,64
0,29 a 0,28	5,6	6,9	7,51	7,45	6,59
0,26 a 0,25	6,6	7,6	7,92	7,87	7,86

FONTE: A AUTORA (2014)

Observam-se, na TABELA 25, que todos os valores encontrados foram superiores aos obtidos por Mendes (2002). Analisando tecnicamente os resultados, o acréscimo de finos e a utilização de areia artificial foram benéficos aos concretos submetidos a ensaios de tração por compressão diametral, pois Mendes (2002) utilizou apenas areia natural em sua pesquisa, evidenciando o que foi encontrado por Buest Neto (2006) e demonstrando a consistência dos resultados obtidos nesse trabalho.

Com os resultados obtidos de resistências à tração por compressão diametral média aos 28 dias para cada relação A/A, foram determinadas as equações de regressão das curvas que representaram a tendência dos resultados para cada teor de pó de pedra. Foi calculado também o coeficiente de determinação de cada equação das curvas de tendência ( $R^2$ ). A TABELA 26 resume os resultados.

TABELA 26: EQUAÇÕES DE REGRESSÃO E R<sup>2</sup> PARA OS VALORES MÉDIOS DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

IDADE (DIAS)	% PÓ DE PEDRA	EQUAÇÕES	R <sup>2</sup>
28	0	$Y = 2,92x^{-0,668}$	0,9962
28	6	$Y = 2,1191x^{-0,888}$	0,977
28	12	$Y = 7,815x^{0,0618}$	0,0109
28	18	$Y = 4,1683x^{-0,344}$	0,879

R<sup>2</sup>: COEFICIENTE DE DETERMINAÇÃO

FONTE: A AUTORA (2014)

Os resultados de coeficiente de determinação obtidos para resistência à tração por compressão diametral apresentam bons ajustes das curvas, com exceção do resultado obtido com 12% de pó de pedra.

A resistência à tração por compressão diametral com o teor de 12% para a relação A/A de 0,28 foi abaixo das duas primeiras. A equação com 12% de pó foi ajustada, retirando o valor atípico de resistência à tração por compressão média e obtendo assim a nova equação e R<sup>2</sup> coerente, conforme TABELA 27.

TABELA 27: EQUAÇÕES DE REGRESSÃO E R<sup>2</sup> AJUSTADOS PARA OS VALORES MÉDIOS DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL COM 12% DE PÓ DE PEDRA

IDADE (DIAS)	% PÓ DE PEDRA	EQUAÇÕES	R <sup>2</sup>
28	0	$Y = 6,5876x^{-0,107}$	0,893

R<sup>2</sup>: COEFICIENTE DE DETERMINAÇÃO

FONTE: A AUTORA (2014)

Cabe destacar que todos os coeficientes de determinação das equações das curvas de tendência (R<sup>2</sup>) para resistência à tração por compressão diametral foram superiores aos obtidos por Mendes (2002), que variaram de 0,8016 a 0,8215.

### 5.3.3 Módulo de elasticidade

A TABELA 28 apresenta os módulos de elasticidades obtidos nos concretos estudados.

TABELA 28: MÓDULOS DE ELASTICIDADES DOS CONCRETOS (GPa)

% PÓ DE PEDRA (A)	NÍVEL DE RESISTÊNCIA											
	50MPa			65MPa			80MPa			95MPa		
0	43,10	42,30	43,70	44,50	47,40	47,30	46,40	46,10	47,40	48,90	48,80	47,60
<b>MÉDIA</b>	<b>43,03</b>			<b>46,40</b>			<b>46,63</b>			<b>48,43</b>		
<b>DP</b>	<b>0,70</b>			<b>1,65</b>			<b>0,68</b>			<b>0,72</b>		
<b>CV (%)</b>	<b>1,63%</b>			<b>3,55%</b>			<b>1,46%</b>			<b>1,49%</b>		
6	51,20	52,50	36,70	49,60	51,90	49,50	28,50	48,40	46,20	51,80	51,90	49,00
<b>MÉDIA</b>	<b>46,80</b>			<b>50,33</b>			<b>41,03</b>			<b>50,90</b>		
<b>DP</b>	<b>8,77</b>			<b>1,36</b>			<b>10,91</b>			<b>1,65</b>		
<b>CV (%)</b>	<b>18,74%</b>			<b>2,70%</b>			<b>26,59%</b>			<b>3,23%</b>		
12	50,60	49,20	52,00	50,40	35,60	51,90	48,10	43,50	52,60	55,00	50,20	52,30
<b>MÉDIA</b>	<b>50,60</b>			<b>45,97</b>			<b>48,07</b>			<b>52,50</b>		
<b>DP</b>	<b>1,40</b>			<b>9,01</b>			<b>4,55</b>			<b>2,41</b>		
<b>CV (%)</b>	<b>2,77%</b>			<b>19,60%</b>			<b>9,47%</b>			<b>4,58%</b>		

DP: DESVIO PADRÃO

CV: COEFICIENTE DE VARIAÇÃO

FONTE: A AUTORA (2014)

A ANOVA, com 95% de nível de significância, realizada com base nos módulos de elasticidade obtidos está apresentada na TABELA 29.

TABELA 29: ANOVA PARA MÓDULOS DE ELASTICIDADES DOS CONCRETOS (GPa)

FONTE	SQ	GDL	MQ	Teste F	F tab	COMPARAÇÃO
% PÓ DE PEDRA (A)	69,79	3	23,26	1,15	2,90	Efeito correspondente não é significativo
RELAÇÃO A/A (B)	100,14	3	33,38	1,65	2,90	Efeito correspondente não é significativo
AB	209,34	9	23,26	1,15	2,19	Efeito correspondente não é significativo
Erro	646,06	32	20,19			
Total	1025,34	47				

SQ: SOMA DE QUADRADOS

GDL: GRAU DE LIBERDADE

MQ: MÉDIAS QUADRADAS

TESTE F: DISTRIBUIÇÃO F DE SNEDECOR

F TAB: VALOR TABELADO DE F DE SNEDECOR

FONTE: A AUTORA (2014)

A ANOVA apresentou efeito não significativo para ambas às fontes de variação e para a interação entre elas.

Para o módulo de elasticidade o efeito do pó de pedra não foi significativo, provavelmente pelo fato de todos concretos terem sido produzidos com o mesmo teor e tipo de agregado graúdo. Isaia, Helene e Tutikian (2011), explicam que o principal parâmetro influente, depois da relação A/A, no módulo de elasticidade do CAR é a resistência do agregado graúdo. Aïtcin (2000) ainda afirma que o CAR comporta-se quase como material compósito real e que, em termos de deformação, comporta-se mais como uma rocha artificial do que com o concreto propriamente dito.

O efeito da fonte da relação A/A, conforme esperado, não foi significativo. À medida que a resistência à compressão aumenta, o concreto apresenta deformação na ruptura cada vez menor, tornando-se mais frágil (ISAIA, HELENE E TUTIKIAN, 2011). A TABELA 30 compara os resultados obtidos do módulo de elasticidade do exemplar dos 3 CPs com os obtidos por Mendes (2002).

TABELA 30: RESUMO DOS RESULTADOS DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DOS CONCRETOS (GPa) E COMPARAÇÃO COM A BIBLIOGRAFIA

MÓDULO DE ELASTICIDADE AOS 28 DIAS					
RELAÇÃO A/AGL	MENDES COM CALCÁRIO (2002)	EXPERIMENTOS			
		0% DE PÓ DE PEDRA	6% DE PÓ DE PEDRA	12% DE PÓ DE PEDRA	18% DE PÓ DE PEDRA
0,37 a 0,35	45,4	43,7	52,5	52	48,7
0,32 a 0,31	43,5	47,40	51,9	51,9	49
0,29 a 0,28	41,2	47,40	48,4	52,6	51,9
0,26 a 0,25	39,9	48,90	51,9	55	50,4

A AUTORA (2014)

Segundo o ACI 363 R-92 (2001), os valores para o módulo de elasticidade do CAR variam da ordem de 31 a 45 GPa, dependendo do método para determinação. Assim, os resultados encontrados estão, na maior parte, na faixa esperada e maiores que os valores encontrados por Mendes (2002), comprovando a validade dos resultados.

Como não foi constatada diferença significativa do teor de pó de pedra no módulo de elasticidade, não foram determinadas as equações de regressão das curvas para módulo de elasticidade.



#### 5.4 ANÁLISE QUANTO AO CONSUMO DE CIMENTO, PARÂMETROS MECÂNICOS E EMISSÃO DE CO<sub>2</sub>

O presente trabalho teve como objetivo analisar os parâmetros mecânicos do CAR produzido com substituição parcial do cimento Portland pelo pó de pedra buscando reduzir o consumo dos aglomerantes e assim as emissões de CO<sub>2</sub>.

A TABELA 31 compara a redução do consumo de cimento com os ganhos nos parâmetros mecânicos com os concretos produzidos com pó de pedra, com o concreto base, sem pó de pedra.

TABELA 31: CONSUMO DE CIMENTO *VERSUS* PARÂMETROS MECÂNICOS

% PÓ DE PEDRA	NÍVEL DE RESISTÊNCIA	REDUÇÃO CIMENTO PORTLAND EM RELAÇÃO AO CONCRETO BASE	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO MÉDIA AOS 28 DIAS EM RELAÇÃO AO CONCRETO BASE	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL MÉDIA EM RELAÇÃO AO CONCRETO BASE	MÓDULO DE ELASTICIDADE MÉDIO EM RELAÇÃO AO CONCRETO BASE
6%	1	13,74%	11,51%	-8,70%	8,75%
	2	11,54%	13,49%	13,73%	8,48%
	3	9,90%	8,14%	14,60%	-12,01%
	4	8,84%	-1,44%	-3,68%	5,09%
<b>MÉDIA</b>		<b>11,01%</b>	<b>7,92%</b>	<b>3,99%</b>	<b>2,58%</b>
12%	1	27,48%	29,54%	21,49%	17,58%
	2	23,08%	24,53%	23,11%	-0,93%
	3	19,87%	-2,62%	12,44%	3,07%
	4	17,76%	3,45%	3,82%	8,40%
<b>MÉDIA</b>		<b>22,05%</b>	<b>13,73%</b>	<b>15,22%</b>	<b>7,03%</b>
18%	1	41,22%	9,11%	1,25%	11,31%
	2	34,62%	-9,95%	-1,14%	3,30%
	3	29,83%	0,20%	8,07%	6,08%
	4	26,67%	-15,45%	-6,94%	0,76%
<b>MÉDIA</b>		<b>33,09%</b>	<b>-4,02%</b>	<b>0,31%</b>	<b>5,36%</b>

FONTE: A AUTORA (2015)

A partir da TABELA 31 foram confirmadas as considerações feitas anteriormente. Com a substituição do cimento Portland pelo pó de pedra foi possível reduzir significativamente o consumo de cimento e, não só manter a faixa de resistência esperada, como para alguns traços obter ganhos nos parâmetros mecânicos.

A redução do consumo de cimento foi mais significativa com 18% de pó de pedra no primeiro nível de resistência, com a relação A/A de 0,35, como era o esperado, visto que foi o maior teor de substituição, 18%, com a menor relação A/A, que consequentemente, apresentou o menor consumo de cimento.

Ao analisar os parâmetros mecânicos, a resistência à tração por compressão diametral média e o módulo de elasticidade médio aumentaram para a maior parte dos teores de pó de pedra em comparação ao concreto base. Isso prova novamente o efeito microfiller do pó nesses parâmetros, já explicado anteriormente. Já quanto à resistência à compressão, da mesma maneira que constatado nas argamassas, a partir de 12% de substituição, provavelmente a elevada quantidade de partículas finas adicionadas não se ajusta perfeitamente entre as aberturas das partículas maiores prejudicando a densificação.

A análise feita quanto às emissões de CO<sub>2</sub> levou em conta somente a emissão de CO<sub>2</sub> na fabricação do cimento, como descrito anteriormente. Foi considerado o mesmo valor de emissão de CO<sub>2</sub> na fabricação do cimento utilizado por Bianchini (2010), 600 kg por tonelada de cimento CPV – ARI.

A TABELA 32 apresenta valores de kg CO<sub>2</sub>/MPa para concretos convencionais obtido por Bianchini (2010), e a TABELA 33 os valores encontrados no presente trabalho e a FIGURA 46 ilustra os valores obtidos.

TABELA 32: EMISSÃO DE CO<sub>2</sub>/MPa CONCRETOS USUAIS (KG)

RESISTÊNCIA MÉDIA AOS 28 DIAS	KG CO <sub>2</sub> /MPa
15	7,4
18	6,77
20	6,45
25	5,9
30	5,56
35	5,38
40	5,3
45	5,28

FONTE: BIANCHINI (2010) – CENTRAIS DOSADORAS DE CONCRETO DE CURITIBA – PR

TABELA 33: EMISSÃO DE CO<sub>2</sub>/MPa CONCRETOS PRODUZIDOS NO PRESENTE TRABALHO (KG)

TEOR DE PÓ DE PEDRA (%)	RESISTÊNCIA MÉDIA AOS 28 DIAS	CONSUMO DE CIMENTO/MPa	KG CO <sub>2</sub> /MPa
0	51,57	7,02	4,21
	62,5	6,54	3,93
	67,54	6,69	4,02
	79,6	6,11	3,66
6	57,5	5,43	3,26
	70,93	5,10	3,06
	73,03	5,58	3,35
	78,45	5,65	3,39
12	66,8	3,93	2,36
	77,83	4,04	2,43
	65,8	5,50	3,30
	82,35	4,85	2,91
18	56,3	3,78	2,27
	62,13	4,30	2,58
	67,67	4,69	2,81
	67,3	5,30	3,18

FONTE: A AUTORA (2015)

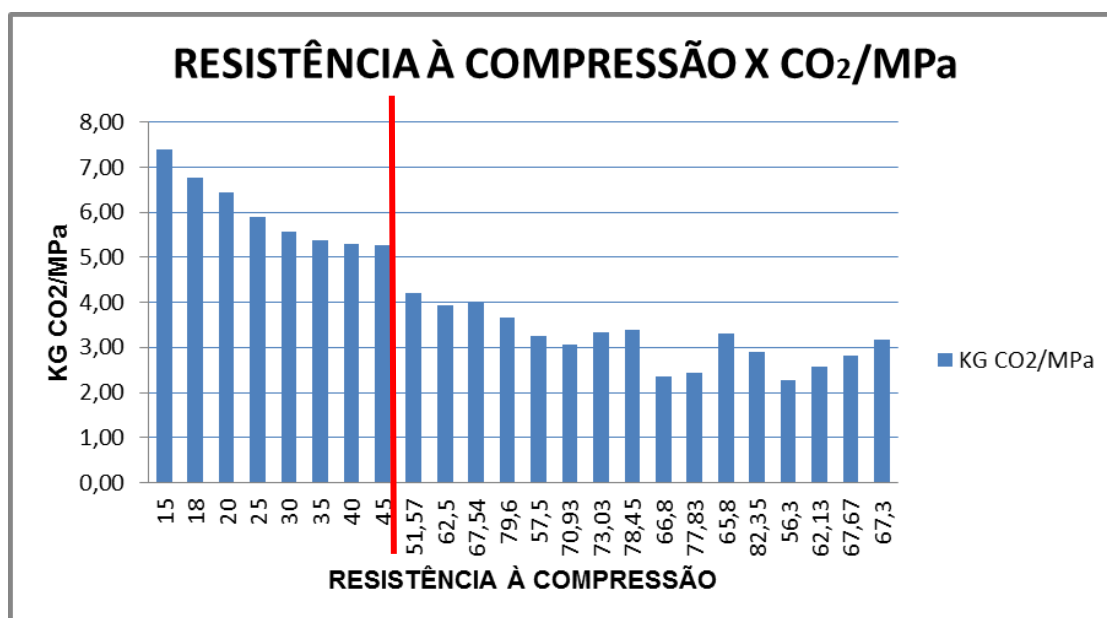


FIGURA 46: EMISSÃO DE CO<sub>2</sub>/MPa VERSUS RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO  
FONTE: A AUTORA (2015); DADOS ATÉ 45MPa ADAPTADOS DE BIANCHINI (2010)

Ao comparar as TABELAS 32 e 33, confirma-se a conclusão obtida por Bianchini (2010). Quanto maior a resistência do concreto, menor será a emissão de  $\text{CO}_2$ , por MPa. A FIGURA 45 ilustra claramente o decréscimo das emissões de  $\text{CO}_2$  ao comparar os concretos convencionais (até 45 MPa) com os CAR (a partir de 51,57 MPa). Os valores dentro dos concretos estudados no presente trabalho variam de acordo com a substituição do cimento Portland pelo pó de pedra e da relação A/A, pois ambos alteram o consumo de cimento, conforme destacado na FIGURA 45.

A TABELA 33 demonstra que a substituição do cimento Portland pelo pó de pedra reduz as emissões de  $\text{CO}_2$ , como o esperado. O menor valor encontrado de  $\text{CO}_2/\text{MPa}$  foi no menor consumo de cimento, com 18% de substituição.

Aitcin (2000) explica que no CAR, a quantidade de água é mais próxima à necessária para reagir com o cimento. Assim, o potencial do cimento é mais bem aproveitado. Já nos concretos convencionais, emprega-se mais água para garantir a trabalhabilidade desejada, conforme mencionado anteriormente.

A FIGURA 47 compara as emissões de  $\text{CO}_2/\text{MPa}$  por teor de pó de pedra.

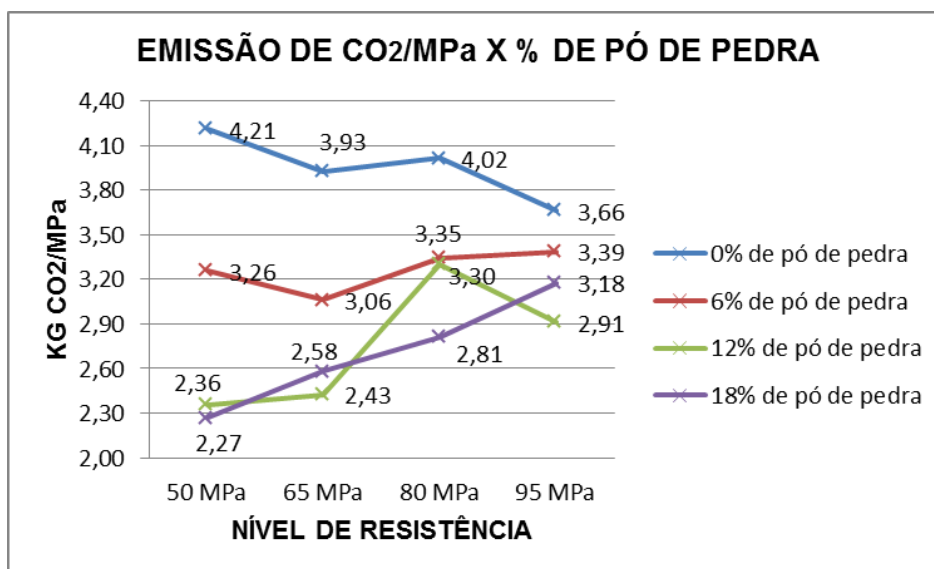


FIGURA 47:  $\text{CO}_2/\text{MPa}$  VERSUS % DE PÓ DE PEDRA  
FONTE: A AUTORA (2015)

A partir da FIGURA 47, comprova-se que a utilização do pó de pedra diminui as emissões de  $\text{CO}_2/\text{MPa}$ , todos os teores, quando comparados ao concreto sem pó de pedra, apresentaram reduções nas emissões de  $\text{CO}_2$  por MPa. Dentre os

concretos com pó de pedra, os valores variam de acordo com o consumo de cimento e faixa de resistência.

## 5.5 ANÁLISE DE CUSTOS

Os custos dos concretos produzidos foram calculados utilizando valores unitários de cada material fornecido pelos fabricantes e transformados em R\$/MPa para comparar o custo com a resistência obtida dos concretos, como explicando anteriormente. Vale destacar que para o pó de pedra foi considerado custo zero, por ser um resíduo das pedreiras gerado pela lavagem da areia artificial. Assim, o valor unitário está embutido no valor da areia artificial.

A TABELA 34 apresenta os valores considerados de cada material da composição dos concretos produzidos e a TABELA 35 os valores em R\$/MPa para cada traço estudado no presente trabalho.

TABELA 34: CUSTOS DAS MATÉRIAS PRIMAS EMPREGADAS (R\$/KG)

MATERIAL	R\$/KG
Cimento CP V - ARI	0,39
Sílica Ativa	1,6
Brita 01	0,028
Areia artificial	0,035
Superplastificante	10,95
Pó de Pedra	0

FONTE: FORNECEDOR (2015)

TABELA 35: CUSTO *VERSUS* RESISTÊNCIA PARA CADA TRAÇO (R\$/MPa)

TEOR DE PÓ DE PEDRA (%)	RESIS. MÉDIA AOS 28 DIAS (MPa)	CIMENTO R\$/MPa	SÍLICA ATIVA R\$/MPa	AREIA ARTIFICIAL R\$/MPa	PÓ DE PEDRA R\$/MPa	BRITA R\$/MPa	SUPERPLASTIFICANTE R\$/MPa	R\$/MPa
0	51,57	2,74	0,96	0,61	0,00	0,57	1,00	5,88
	62,50	2,55	0,90	0,48	0,00	0,47	0,93	5,33
	67,54	2,61	0,92	0,42	0,00	0,44	0,96	5,35
	79,60	2,38	0,84	0,34	0,00	0,37	0,87	4,81
6	57,5	2,12	0,74	0,55	0,00	0,51	0,90	4,82
	70,93	1,99	0,70	0,42	0,00	0,42	0,82	4,35
	73,03	2,17	0,76	0,39	0,00	0,40	0,88	4,62
	78,45	2,20	0,77	0,35	0,00	0,38	0,88	4,59
12	66,8	1,53	0,54	0,47	0,00	0,44	0,77	3,76
	77,83	1,58	0,55	0,38	0,00	0,38	0,75	3,64
	65,8	2,15	0,75	0,43	0,00	0,45	1,23	5,01
	82,35	1,89	0,66	0,33	0,00	0,36	1,05	4,30
18	56,3	1,47	0,52	0,56	0,00	0,52	1,61	4,68
	62,13	1,68	0,59	0,48	0,00	0,48	1,64	4,87
	67,67	1,83	0,64	0,42	0,00	0,44	1,67	5,00
	67,3	2,07	0,73	0,41	0,00	0,44	1,80	5,44

FONTE: A AUTORA (2015)

A TABELA 36 apresenta o valor de R\$/MPa de concretos usuais, obtidos de Bianchini (2010) e a FIGURA 48 compara os valores de R\$/MPa dos concretos usuais com os produzidos no presente trabalho.

TABELA 36: R\$/MPa DE CONCRETOS USUAIS

RESISTÊNCIA MÉDIA AOS 28 DIAS	R\$/MPa
15,00	7,96
18,00	7,71
20,00	7,14
25,00	6,14
30,00	5,49
35,00	5,06
40,00	4,76
45,00	4,57

FONTE: BIANCHINI (2010) – CENTRAIS DOSADORAS DE CONCRETO DE CURITIBA - PR

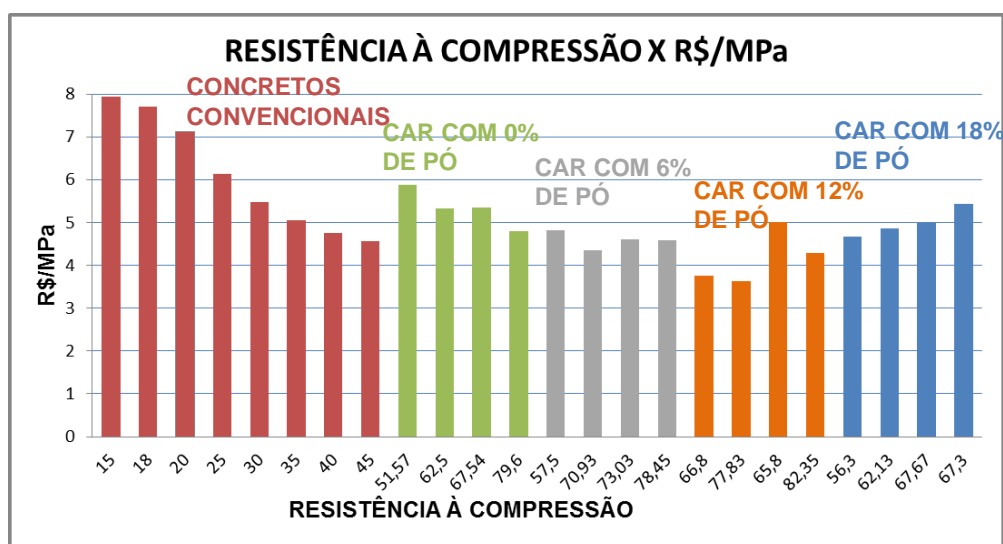


FIGURA 48: R\$/MPa VERSUS RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

FONTE: A AUTORA (2015); DADOS ATÉ 45MPa ADAPTADOS DE BIANCHINI (2010)

A FIGURA 47 demonstra que, ao comparar o CAR com concretos convencionais, foi possível reduzir o custo por MPa. Segundo Bianchini (2010), quanto maior a resistência alcançada, maior o custo total de matéria prima, porém o valor por MPa pode apresentar pontos positivos.

Mesmo com teores superiores de superplastificante, ao substituir o cimento Portland pelo pó de pedra houve redução nos custos totais do concreto produzido, por MPa até o teor de substituição de 12% com a relação A/A de 0,28, como o

esperado. Já que a partir desse valor, o teor de superplastificante teve que ser aumentando para garantir a trabalhabilidade dos concretos no estado fresco. O consumo de superplastificante representa uma parcela considerável no custo total dos concretos. Dessa forma, sua otimização reduz de forma significativa o custo do metro cúbico do concreto (FREITAS, 2005).

A FIGURA 49 compara os custos/MPa por teor de pó de pedra.

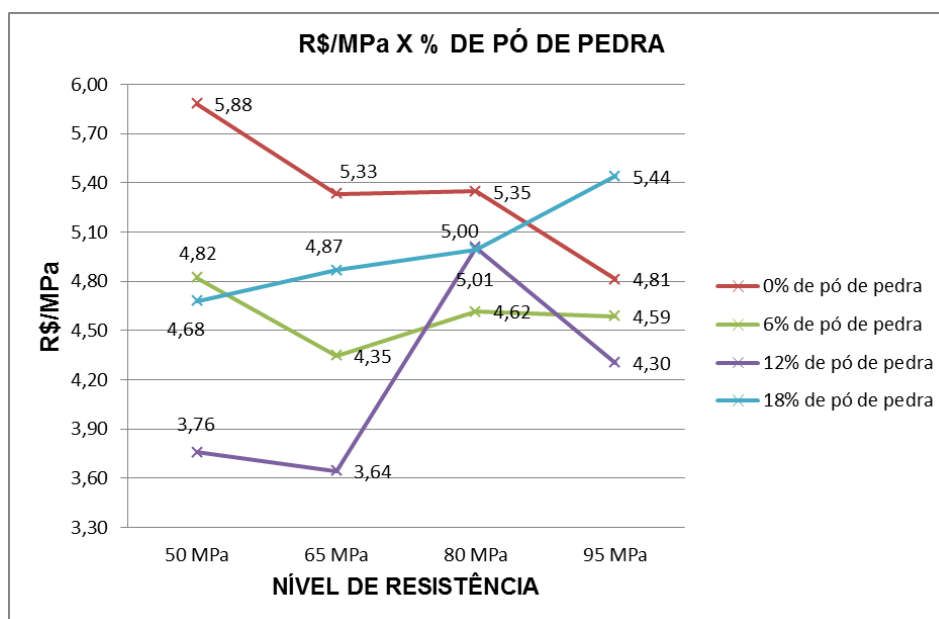


FIGURA 49: R\$/MPa VERSUS % DE PÓ DE PEDRA  
 FONTE: A AUTORA (2015)

Assim, do ponto de vista econômico, da mesma forma que constatado quanto à caracterização mecânica, o CAR produzido com 12% de substituição do cimento Portland pelo pó de pedra nas relações A/A de 0,35 e 0,31 foram os mais vantajosos.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir do programa experimental, dos resultados obtidos nos ensaios mecânicos e dos dados das análises estatísticas, pode-se chegar à seguinte conclusão geral:

- A substituição parcial do cimento Portland pelo pó de pedra no concreto de alta resistência produzido com areia artificial mantém estatisticamente as propriedades de resistência à compressão, à tração por compressão diametral e o módulo de elasticidade. Fazendo uma análise de variância com os níveis adotados de substituição (0%, 6%, 12% e 18%) e para as diversas classes de resistência (C50, C65, C80 e C95) verifica-se, num parâmetro geral, que principalmente as propriedades de resistência mostram uma tendência de melhoria com a substituição de cimento Portland por pó de pedra. A influência é significativa na resistência à compressão e na resistência à tração por compressão diametral. Já no módulo de elasticidade, a influência não é significativa. Quanto ao consumo de cimento a maior redução, em média 33,09%, é com 18% de substituição. Nos parâmetros mecânicos os melhores resultados são com 12% de substituição, sendo que com esse teor, é possível reduzir 22,05% o consumo de cimento, com o aumento médio de 13,73% na resistência à compressão, 15,22% na resistência à tração por compressão diametral e 7,03% no módulo de elasticidade, em relação aos concretos produzidos sem a substituição do cimento Portland pelo pó de pedra. Também é relevante a diminuição da emissão de CO<sub>2</sub> por unidade de resistência, bem como a solução pode ser significativa em termos de custo.

As conclusões específicas para cada fator estudado são:

1. Os resultados confirmam a influência da adição de pó de pedra na consistência da argamassa e da pasta de cimento Portland. De maneira geral, há redução no espalhamento à medida que se aumenta o teor de pó de pedra, e provavelmente, esse fenômeno está associado à superfície específica do pó de pedra. O superplastificante,



como esperado, age sobre o pó, quanto maior a quantidade, maior a fluidez para maior parte dos casos. Até o teor de 0,9% de superplastificante o espalhamento cresce e a partir do mesmo os valores se estabilizam. Assim, provavelmente o teor de 0,9% está próximo do ponto de saturação do aditivo para a pasta de cimento Portland;

2. Produzir argamassas com pó de pedra em substituição a areia artificial apresenta uma tendência de aumentar a resistência à compressão, provavelmente, devido ao efeito microfíler do pó. Os valores mais altos alcançados são com os teores de 12% de substituição da areia artificial por pó de pedra, porém com valores muito próximos a 18%. A partir desse teor o efeito de afastamento começa a acontecer. São significativas apenas as comparações entre 18% e 0%, 12% e 6% e entre 12% e 0% no teor de 0,9% de superplastificante;
3. Produzir argamassas e CAR com a utilização de 100% de areia artificial, com as condições de ensaios e materiais utilizados na pesquisa, em substituição à areia natural é viável, a maior demanda de água pode ser corrigida com a utilização de aditivos superplastificantes de terceira geração;
4. É possível a produção de CAR com pó de pedra obtido através do processo de britagem dos agregados graúdos e miúdos, sem a necessidade de peneiramento. A média da perda de consistência foi de 3,63% e não há diferença significativa entre os resultados;
5. No CAR, as propriedades de resistência mostram uma tendência de melhoria com a substituição de cimento Portland por pó de pedra, principalmente com o teor de 12%. A influência é significativa na resistência à compressão e na resistência à tração por compressão diametral. Já no módulo de elasticidade, a influência não é significativa. Na comparação múltipla de médias para a resistência à compressão, é significativa a diferença entre 12% e 0% no primeiro nível de resistência, relação A/A de 0,35. No segundo nível de resistência, relação A/A de 0,31, são significativas as diferenças entre 12% e 0% e 18% e 12% e para o quarto nível, entre 18% e 12%. Assim, em uma

análise estatística geral para a resistência à compressão média aos 28 dias, 83% das comparações não são significativas, o que demonstra que, apesar das resistências mecânicas mostrarem uma tendência de melhoria com a substituição do cimento Portland pelo pó de pedra, a maior parte dos resultados são iguais. Para a resistência à tração por compressão diametral, apenas as comparações entre 12% e 6% no primeiro nível de resistência, A/A de 0,35, e 18% e 12% no segundo nível de resistência, A/A de 0,31, apresentaram diferenças significativas. Dessa forma, em uma análise geral, 92% das comparações não são significativas.

6. Com a substituição do cimento Portland pelo pó de pedra é possível reduzir significativamente o consumo de cimento. A redução do consumo de cimento é mais significativa com 18% de pó de pedra no primeiro nível de resistência, com a relação A/A de 0,35, visto que é o maior teor de substituição, 18%, com a menor relação A/A, que consequentemente, apresenta o menor consumo de cimento;
7. Quanto maior a resistência do concreto, menor será a emissão de CO<sub>2</sub>, por MPa. O menor valor de CO<sub>2</sub>/MPa é no menor consumo de cimento, com 18% de substituição;
8. Ao substituir o cimento Portland pelo pó de pedra, de maneira geral, há redução nos custos totais do concreto produzido, por MPa, viabilizando economicamente o emprego do mesmo. Os concretos de alta resistência produzidos com 12% de substituição do cimento Portland pelo pó de pedra nas relações A/A de 0,35 e 0,31 são os mais vantajosos.

## 6.1 SUGESTÕES PARA NOVAS PESQUISAS

A partir dos resultados obtidos no programa experimental, das dúvidas e curiosidades que surgiram com o trabalho sugerem-se alguns assuntos a serem estudados em futuras pesquisas:

1. Investigar as propriedades relacionadas à durabilidade em CAR produzidos pó de pedra;
2. Estudar a influência da granulometria dos agregados graúdos para os concretos estudados a fim de avaliar o aumento da resistência à compressão ao reduzir a dimensão máxima característica dos agregados graúdos;
3. Analisar a influência do empacotamento granulométrico dos agregados graúdos, miúdos e do pó de pedra na produção de CAR;
4. Otimizar o método de dosagem Aïtcin (2000) com 100% de areia artificial e com a substituição do cimento Portland pelo pó de pedra;
5. Avaliar o impacto ambiental de toda cadeia produtiva do CAR.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AÏTCIN, P.C. **Concreto de Alto Desempenho**, tradução de Geraldo G. Serra – São Paulo – Editora Pini, 2000.

AÏTCIN, P.C. *Binders for Durable and Sustainable Concrete*. Ed. Taylor e Francis, 2008.

ALMEIDA, I.R. **Concreto de alto desempenho**. In: **Concreto: ensino, pesquisa e realizações V2** / ed. G. C. ISAIA. São Paulo: IBRACON, 2005.

ALMEIDA, S.L.M.; SILVA, V.S. Areia artificial: uma alternativa econômica e ambiental para o mercado nacional de agregados. In: *II SUFFIB – Seminário: O Uso da Fração Fina da Britagem*, São Paulo, 2005. **Anais**. Eds. Cuchierato et al.

ALVES, M. F. **Estudo comparativo de métodos de dosagem para concreto de alta resistência**. Dissertação (Mestrado em Engenharia), Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2000.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Committee 363. State-of-the-report on high-strength concrete, ACI 363R-92 (Reapprove 1997). **ACI Manual of Concrete Practice 2001**. ACI, Detroit (USA), 2001. 55 p.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 209R 92 (Reapproved 1997). Prediction of cree, shrinkage and temperature in concreto strctures. *ACI Manual of Concrete Practice 2001*. ACI, Detroit (USA), 2001. 47 p.

ANDRIOLO, F. R. Usos e abusos do pó de pedra em diversos tipo de concreto. In: *Seminário: O uso da fração fina da britagem. II SUFFIB*, São Paulo, 2005. **Anais**, São Paulo, EPUSP, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova, Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13276**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Preparo da mistura e determinação do índice de consistência, Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: Concreto –

Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos, Rio de Janeiro, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9833**: Concreto fresco - Determinação da massa específica e do teor de ar pelo método gravimétrico - Método de ensaio, Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10908**: Aditivos para argamassa e concreto - Ensaio de caracterização, Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211**: Agregados para concreto, Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8522**: Concreto – Determinação do módulo estático de elasticidade e compressão, Rio de Janeiro: ABNT, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8953**: Concreto para fins estruturais, Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15900**: Água para amassamento do concreto, Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9935**: Agregados – Terminologia, Rio de Janeiro: ABNT, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11768**: Aditivos para concreto de cimento Portland, Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7222**: Argamassa e concreto – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos, Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7681**: Calda de cimento para injeção. Parte 2: Determinação do índice de fluidez e da vida útil — Método de ensaio, Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento, Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 46:** Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 um, por lavagem Rio de Janeiro: ABNT, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 51:** Agregado graúdo - Ensaio de abrasão “Los Ángeles” Rio de Janeiro: ABNT, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 45:** Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios, Rio de Janeiro: ABNT, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 52:** Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente, Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 53:** Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água, Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

BARBOSA, M. T. G.; COURA, C. V. G.; MENDES, L. D. O. Estudo sobre a areia artificial em substituição à natural para confecção de concreto. **Ambiente construído**, v. 8, n. 4, p. 51-60, 2008.

BASTOS, S. R. B. **Uso de areia artificial basáltica em substituição parcial a areia fina para produção e concretos convencionais.** In: II SUFFIB – Seminário: O Uso da Fração Fina da Britagem, São Paulo, 2005. Anais. Eds. Cuchierato et al.

BIANCHINI, M. **Análise da influência dos teores de sílica ativa na produção de concretos de alta resistência em central dosadora de concreto.** Dissertação (Mestrado em Construção Civil), Universidade Federal do Paraná (UFPR), Curitiba, 2010.

BONAVETTI, V.L.; IRASSAR, E.F. The effect of stone dust content in sand. *Cement and Concrete Research*, v. 24, n. 3, p. 580-590, Jan. 1994.

BUEST NETO, G. T. **Estudo da substituição dos agregados miúdos naturais por agregados miúdos britados em concretos de cimento Portland.** Dissertação (Mestrado em Construção Civil), Universidade Federal do Paraná (UFPR), Curitiba, 2006.

CAMÕES, A. **Betões de elevado desempenho com elevado volume de cinzas volantes.** Engenharia Civil ISSN 0873-1152. 23, Guimarães, 2005.

CASTRO, A. L. Aplicação de conceitos reológicos na tecnologia de concretos de alto desempenho. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia dos Materiais), Universidade de São Paulo, Escola de engenharia de São Carlos (USP – EESC), São Paulo, 2007.

CASTRO, A. L. de, PANDOLFELLI, V. C. Revisão: Conceitos de dispersão e empacotamento de partículas para a produção de concretos especiais aplicados na construção civil. **Cerâmica** 55 (2009) 18-32.

CASTRO, A. L. de, J. B. LIBORIO, PANDOLFELLI, V. C. Reologia de concretos de alto desempenho aplicados na construção civil – Revisão. **Cerâmica** 57 (2011) 63-75.

CELIK, T; MARAR, K. Effects of crushed stone dust on some properties of concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 26, n. 7, p. 1121-1130, 1996.

CHIES, J. A.; ROHDEN, A. B.; SILVA FILHO, L. C. P. **Tratamentos superficiais em corpos de prova de concreto submetidos à compressão**. Revista Ibracon de Estruturas e Materiais, v. 7, n. 5, p. 775 – 800, 2014.

CORDEIRO, G. C.; TOLEDO FILHO, R. D.; FAIRBAIRN, E. M. R. Influência da substituição parcial de cimento por cinza ultrafina da casca de arroz com elevado teor de carbono nas propriedades do concreto. **Ambiente construído**, v. 9, n. 4, p. 99-107, 2009.

CUCHIERATO, G. Caracterização tecnológica de resíduos da mineração de agregados da Região metropolitana de São Paulo (RmsP), visando seu aproveitamento econômico. Dissertação (Mestrado em Recursos Minerais), Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

DA SILVA, G. F. Estudo de concretos de alto desempenho frente à ação de cloretos. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia dos Materiais), Universidade de São Paulo, Escola de engenharia de São Carlos (USP – EESC), São Carlos, 2006.

DAL MOLIN, D. C. C. **Contribuição ao estudo das propriedades mecânicas dos concretos de alta resistência com e sem adições de microssílica**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.

DAL MOLIN, D. C.; VIEIRA, F.M.P.; WOLF, J., **Concreto de Alta Resistência**. CDROM:Concreto de Alto Desempenho, Versão 1.0. Produzido por NUTAU/USP. 1997.

DAL MOLIN, D. C. C.; OLIVEIRA, A. P. M. Estudo de concretos com adição de sílica ativa (microsílica) frente ao ataque de agentes agressivos para empregos em pisos especiais. s. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON HIGH-PERFORMANCE CONCRETE AND PERFORMANCE AND QUALITY OF CONCRETE STRUCTURES, 1., 1996, Florianópolis. **Proceedings..** Florianópolis: UFSC, 1996. p. 590-598.

DE LARRARD, F. **Concrete Mixture Proportioning: A Scientific Approach**. Ed. Taylor & Francis, 1999. 421 p.

ERDOGDU, S. Compatibility of superplasticizers with cements different in composition, Cem. Concr. Res. 30, 5 (2000) 767-773.

EREN, O; MARAR, K. Effects of limestone crusher dust and steel fibers on concrete. **Construction and Building Materials**, v. 23, p. 981–988, 2009.

FORMAGINI, S. **Dosagem científica e caracterização mecânica de concretos de altíssimo desempenho**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, 2005.

FREITAS, J. A. Jr. **Estudo comparativo de métodos de dosagem para concretos de alta resistência com o uso de agregados graúdos disponíveis na região metropolitana de Curitiba**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil) – Departamento de Construção Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

FUNK, J. E. e DINGER, D. R. **Predictive Process Control of Crowded Particulate Suspensions: Applied to Ceramic Manufacturing**. Ed. Springer, 1993. 824 p.

GONÇALVES, J.P; TAVARES, L.M; TOLEDO FILHO, R.D; FAIRBAIRN, E.M.R; CUNHA, E.R. Comparison of natural and manufactured fine aggregates in cement mortars. **Cement and Concrete Research**, v.37, p.924–932, 2007.

HARTMANN, C.T. **Avaliação de aditivos superplastificantes base policarboxilatos destinados a concretos de cimento Portland**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

HARTMAN, C. T.; HELENE, P. R. L., **Pilares com 125 MPa: Recorde Mundial em Concreto de Alto Desempenho Colorido**, 2004.



HENDRINKS, C.A; WORREL, E. de JAGER, D.; BLOK, K.: RIME. P. **Emission reduction of greenhouse gases from the cement industry**. Greenhouse Gas R&D. 2004.

IPCC - INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **The Physical Science Basis, Summary for Policy Makers**. IPCC Secretariat, Geneva, Switzerland, 2007.

IPCC - INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate-resilient pathways: adaptation, mitigation, and sustainable development**. IPCC Secretariat, Geneva, Switzerland, 2014.

ISAIA, G. C; HELENE, P.; TUTIKIAN, B. F. **Concreto de Alto e Ultra-Alto Desempenho**. Concreto: Ciência e Tecnologia.Cap. 36, 2011.

JALALI, S; TORGAL, P.F. Considerações sobre a sustentabilidade dos materiais de construção. **Engenharia e Vida**, 2008.

JOHN, V. M. **A construção, o meio ambiente e a reciclagem, 2005**. Disponível em:<<http://www.placogyps.com.br/download/A%20Constru%E7%E3o%20Civil%20e%20o%20Meio%20Ambiente.pdf>>. Acesso em: 15/03/2013.

KLEIN, N. S. **Influência da substituição da areia natural pela areia de britagem no comportamento do concreto auto-adensável**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Edificações e Saneamento) – Universidade Estadual de Londrina, 2008.

KRUG, L.C. Influência do beneficiamento por peneiramento no comportamento da cinza de casca de arroz: Estudo como adição pozolânica em concretos. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2011.

MALHOTRA V.M & MEHTA, P. K. &. **High-performance high volume fly ash concrete**. Ottawa, 3th edition, 2008.

MEHTA, P.K. **Concrete technology for sustainable development**. Concrete International, November, 1999.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, PAULO J. M. **Concreto – Estrutura, Propriedades e Materiais**. 3ª. ed. São Paulo: Ibracon, 2008.

MEHTA, P. K.. **Society, sustainability, and the global concrete industry**. Trabalho apresentado no 51º Congresso Brasileiro do Concreto, Ibracon, Curitiba, 2009.

MENDES, S. E. da S. **Estudo experimental de concreto de alto desempenho utilizando agregados graúdos disponíveis na região metropolitana de Curitiba**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil) – Departamento de Construção Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2002.

MENOSE, R. T. **Utilização de Pó de Pedra Basáltica em substituição a Areia Natural do Concreto**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia do Campus de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2004.

MINEROPAR – MINERAIS DO PARANÁ S/A. Substâncias deletérias dos agregados. Disponível em:< <http://www.mineropar.pr.gov.br> >. Acesso em: 14 de maio, 2013.

MOURA, R. Efeitos simbólicos do museu Oscar Niemeyer na internacionalização de Curitiba. *Arquitextos*, São Paulo, ano 11, n. 125.08, Vitruvius, out. 2010.

NAKAMURA, J. Economia concreta: Elevar a resistência do concreto pode gerar ganhos de espaço, prazo e dinheiro. **Téchne**, São Paulo, edição 115, nov. 2006.

NELSON, E. & GUILLOT, D. (Ed.), *Well Cementing*, 2nd Ed., Schlumberger, 2006.

NEVILLE A. M. **Propriedades do Concreto**. Tradução de GIAMMUSSO, S. E. 2ª.ed. São Paulo: Pini, 1997.

PANDOLFELLI, V.C.; OLIVEIRA, R. I.; STUART, A. R. et al. **Dispersão e empacotamento de partículas – Princípios e aplicações em processamento cerâmico**. São Paulo: Fazendo Arte, 2000. 224 p

PEREIRA, T. **Concreto auto adensável, de alta resistência, com baixo consumo de cimento Portland e com adição de fibras de lã de rocha ou poliamida**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil. Universidade de São Paulo, Escola de engenharia de São Carlos (USP – EESC), São Paulo, 2010.

RIBEIRO, J. L. D.; CATEN, C. T. **Projeto de experimentos**, FEENG/ UFRGS, Porto Alegre, 2003.

SÁ, M. V. V. A. Influência da substituição da areia natural por pó de pedra no comportamento mecânico, microestrutural e eletroquímico de concretos. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia dos Materiais), Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2006.

SILVA, I. J. Contribuição ao estudo dos concretos de elevado desempenho: propriedades mecânicas, durabilidade e microestrutura. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia dos Materiais), Universidade de São Paulo, Escola de engenharia de São Carlos (USP – EESC), São Paulo, 2000.

TORRICO, F. A. **Análise teórica e experimental do comportamento de pilares esbeltos de concreto de alta resistência, considerando a ductilidade.** Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas). Universidade de São Paulo, Escola de engenharia de São Carlos (USP – EESC), São Carlos, 2010.

VANDERLEI, R. D. **Análise experimental de pilares de concreto armado de alta resistência sob flexo compressão reta.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Escola de Engenharia de São Carlos (USP – EESC), Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999.

WEIDMANN, D. F. Contribuição ao estudo da influência da forma da composição granulométrica de agregado miúdos de britagem nas propriedades do concreto de cimento Portland. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

## **ANEXOS**

## ANEXO A

Resultados: Consistência da argamassa – Flow Table e Cone de Kantro.

TRAÇOS		FLOW TABLE (cm)				MINICONE DE KANTRO (cm)			
	Nº ENSAIO	MEDIÇÃO 1	MEDIÇÃO 2	MEDIÇÃO 3	MÉDIA	MEDIÇÃO 1	MEDIÇÃO 2	MEDIÇÃO 3	MÉDIA
BASES	1	36,0000	37,2000	37,0000	36,7333	5,3000	5,5000	5,5000	5,4333
	2	33,0000	34,3000	35,0000	34,1000	4,3000	4,4000	4,4000	4,3667
	3	32,9000	32,7000	32,9000	32,8333	4,2000	4,3500	4,3500	4,3000
	4	29,5000	30,5000	29,5000	29,8333	3,7500	3,8500	3,8500	3,8167
SUPERPLASTIFICANTE	1	39,7000	40,4000	39,4000	39,8333	10,0100	10,1000	10,1500	10,0867
	2	45,5000	45,0000	44,5000	45,0000	15,1000	15,3500	15,4000	15,2833
	3	46,5000	46,5000	46,0000	46,3333	24,0000	27,0000	28,5000	26,5000
	4	50,0000	50,0000	50,0000	50,0000	20,0000	27,0000	32,0000	26,3333
	5	38,7000	39,5000	39,5000	39,2333	8,6500	8,7000	8,7300	8,6933
	6	45,0000	45,0000	45,0000	45,0000	14,6000	14,9000	15,0000	14,8333
	7	50,0000	50,0000	50,0000	50,0000	8,4500	8,5100	8,5300	8,4967
	8	50,0000	50,0000	50,0000	50,0000	15,2500	17,1000	17,9500	16,7667
	9	36,5000	36,0000	36,7000	36,4000	6,2000	6,2300	6,3000	6,2433
	10	44,0000	44,5000	44,0000	44,1667	13,1800	13,2000	13,2000	13,1933
	11	43,5000	44,0000	43,5000	43,6667	19,0000	21,0000	22,5000	20,8333
	12	50,0000	50,0000	50,0000	50,0000	18,4000	19,2000	19,8000	19,1333
	13	35,6000	36,6000	36,0000	36,0667	7,1200	7,1500	7,2000	7,1567
	14	42,5000	44,5000	44,5000	43,8333	13,5000	13,8000	13,9000	13,7333
	15	50,0000	50,0000	50,0000	50,0000	15,0000	16,1000	17,3000	16,1333
	16	50,0000	50,0000	50,0000	50,0000	23,5000	26,5000	27,4000	25,8000

## ANEXO B

Resultados: Ensaio determinação ótima de superplastificante – Cone de Kantro.

TRAÇOS		MINICONE DE KANTRO (cm)			
	Nº ENSAIO	MEDIÇÃO 1	MEDIÇÃO 2	MEDIÇÃO 3	MÉDIA
0% SP	1	3,1000	3,5200	3,9400	3,5200
	2	4,6000	4,6800	4,8000	4,6933
	3	4,4000	4,4000	4,4500	4,4167
	4	4,0200	4,2000	4,2400	4,1533
0,3% SP	5	15,7900	15,8900	15,9000	15,8600
	6	15,0000	15,2000	15,2500	15,1500
	7	14,9000	15,0000	15,0000	14,9667
	8	14,0000	14,1200	14,2000	14,1067
0,6% SP	9	17,4000	18,2900	18,5000	18,0633
	10	20,2000	21,5000	21,6000	21,1000
	11	21,2500	22,0000	22,6000	21,9500
	12	20,0000	21,0000	21,3000	20,7667
0,9% SP	13	21,9000	23,7000	23,7000	23,1000
	14	20,5000	23,0000	23,5000	22,3333
	15	23,5000	29,5000	29,5000	27,5000
	16	21,0000	26,0000	26,0000	24,3333
1,2% SP	17	22,5000	21,5000	24,5000	22,8333
	18	21,0000	22,5000	22,5000	22,0000
	19	18,8000	18,9000	20,0000	19,2333
	20	20,4000	20,8000	21,0000	20,7333
1,6% SP	21	18,3000	18,5500	18,7000	18,5167
	22	19,2000	20,1000	20,5000	19,9333
	23	19,7000	20,5000	21,2000	20,4667
	24	19,5000	20,0000	20,3000	19,9333

## ANEXO C

Resultados: Cone de Kantro com pó de pedra sem passar pelo processo de peneiramento na #200.

TRAÇOS		MINICONE DE KANTRO (cm)			
	Nº ENSAIO	MEDIÇÃO 1	MEDIÇÃO 2	MEDIÇÃO 3	MÉDIA
0% SP	1	3,1000	3,5200	3,9400	3,5200
	2	4,3000	4,5000	4,9000	4,5667
	3	4,2000	4,4000	4,5000	4,3667
	4	4,3000	4,4000	4,4000	4,3667
0,3% SP	5	15,7900	15,8900	15,9000	15,8600
	6	12,1000	12,1000	12,3000	12,1667
	7	14,1000	14,2000	14,2000	14,1667
	8	14,5000	14,5000	14,6000	14,5333
0,6% SP	9	17,4000	18,2900	18,5000	18,0633
	10	21,1000	21,2000	21,4000	21,2333
	11	20,0000	20,0000	21,1000	20,3667
	12	21,4000	21,4000	21,6000	21,4667
0,9% SP	13	21,9000	23,7000	23,7000	23,1000
	14	20,5000	20,6000	20,6000	20,5667
	15	22,0000	22,2000	22,8000	22,3333
	16	19,6000	19,8000	20,0000	19,8000
1,2% SP	17	22,5000	21,5000	24,5000	22,8333
	18	20,4000	21,0000	21,3000	20,9000
	19	20,0000	20,0000	20,4000	20,1333
	20	20,0000	20,1000	20,1000	20,0667
1,6% SP	21	18,3000	18,5500	18,7000	18,5167
	22	19,0000	19,2000	19,2000	19,1333
	23	19,2000	19,2000	19,3000	19,2333
	24	19,0000	19,1000	19,2000	19,1000

## ANEXO D

Resultados: Ensaio Resistência à compressão das argamassas.

RESULTADOS ENSAIOS - CP 5 cm x 10 cm					
CORPO DE PROVA	FORÇA (N)	RESISTÊNCIA (MPA)	RESISTÊNCIA MÉDIA POR TRAÇO (MPA)	PÓ (Kg)	SUPERPLASTIFICANTE (Kg)
1	3705	18,8955	20,89725	0%	0,00%
	4490	22,899			
2	47653	24,3	21,8	6%	0,00%
	37870	19,3			
3	42485	21,6	20,45	12%	0,00%
	37870	19,3			
4	42485	21,6	23	18%	0,00%
	47885	24,4			
5	43640	19,6	20,9	0%	0,30%
	55679	22,2			
6	57832	28,4	28,95	0%	0,60%
	48686	29,5			
7	52120	24,8	25,65	0%	0,90%
	38906	26,5			
8	62797	31,9	31,95	0%	1,20%
	62894	32,0			
9	48043	21,8	23,15	6%	0,30%
	55447	24,5			
10	42565	28,2	24,95	6%	0,60%
	72011	21,7			
11	43531	36,7	29,45	6%	0,90%
	58167	22,2			
12	72156	29,6	33,15	6%	1,20%
	52277	36,7			
13	40750	26,8	23,8	12%	0,30%
	64410	20,8			
14	55360	32,8	30,5	12%	0,60%
	77050	28,2			
15	76596	39,2	39,1	12%	0,90%
	71258	39			
16	72226	36,3	36,55	12%	1,20%
	51785	36,8			
17	48992	26,4	25,7	18%	0,30%
	60152	25			
18	59319	30,6	30,4	18%	0,60%
	73897	30,2			
19	72725	37,6	37,3	18%	0,90%
	72342	37			
20	76777	36,8	37,95	18%	1,20%
	58032	39,1			



## ANEXO E

Caracterização mecânica concreto com 0% de pó de pedra.

RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO											
FAIXA DE RESIST.	IDADE (DIAS)	REGISTRO DA AMOSTRA	CORPO DE PROVA	DIÂMETRO (mm)	ALTURA (mm)	FORÇA MÁXIMA (N)	RESIST. À COMPRESSÃO	RESIST. EXEMPLAR	RESIST. MÉDIA	DATA DA RUPTURA	HORA DA RUPTURA
1 - A/C = 0,35	3	E - 3320	1	100,4	203,3	326794	41,3	41,4	40,6	25/9	11:22
			2	100,2	202,3	326137	41,4				
			3	100,2	202	308809	39,2				
2 - A/C = 0,31	3	E - 3321	1	100,5	202,5	364560	46	49,0	47,4	25/9	11:34
			2	100,5	202,1	388459	49				
			3	100	201,4	369921	47,1				
3 - A/C = 0,28	3	E - 3322	1	100,7	201,2	462125	58	58,0	53,8	25/9	11:46
			2	100,4	202	427229	54				
			3	100,4	201,4	391433	49,4				
4 - A/C = 0,26	3	E - 3323	1	100	202,2	531433	63,7	66,3	65,2	25/9	13:05
			2	100,3	204,8	518118	65,6				
			3	100	205	528941	66,3				
1 - A/C = 0,35	7	E - 3320	1	100,6	204,8	411043	51,7	51,7	50,9	29/9	10:50
			2	100,2	206,6	398938	50,6				
			3	100,8	204,7	433869	50,5				
2 - A/C = 0,31	7	E - 3321	1	99,8	203,3	465307	59,5	59,5	57,6	29/9	11:02
			2	100,5	204,6	435875	54,9				
			3	100	204,4	458493	58,4				
3 - A/C = 0,28	7	E - 3322	1	100,5	203,3	516562	65,1	65,1	63,2	29/9	11:22
			2	100,6	204,2	502243	63,2				
			3	100,4	203,8	484605	61,2				
4 - A/C = 0,26	7	E - 3323	1	100,2	203,9	546754	69,3	80,7	74,7	29/9	11:33
			2	100,7	205,1	590643	74,2				
			3	100	205,6	633597	80,7				
1 - A/C = 0,35	28	E - 3320	1	100,5	206	381161	48	54,4	51,6	20/10	10:25
			2	100,6	205,1	415470	52,3				
			3	100,5	206,5	400287	54,4				
2 - A/C = 0,31	28	E - 3321	1	100	207,7	450400	57,3	69,0	62,5	20/10	10:47
			2	100,4	205,5	546547	69				
			3	100,2	205,5	482392	61,2				
3 - A/C = 0,28	28	E - 3322	1	100,3	205	588256	74,5	74,5	67,5	20/10	11:05
			2	100,6	204,6	502866	63,3				
			3	100,2	206	510924	64,8				
4 - A/C = 0,26	28	E - 3323	1	100,5	205,2	602989	76	83,0	79,6	20/10	11:40
			2	100,6	205	659951	83				
			3	100,3	208,3	630692	79,8				

RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL										
FAIXA DE RESIST.	IDADE (DIAS)	REGISTRO DA AMOSTRA	CORPO DE PROVA	DIÂMETRO (mm)	ALTURA (mm)	CARGA DE RUPTURA (N)	TENSÃO DE RUPTURA (MPa)	RESIST. MÉDIA (MPa)	RESIST. DO EXEMPLAR (MPa)	DATA DA RUPTURA
1 - A/C = 0,35	28	E - 3320	1	100,1	201,9	187601	5,91	5,9	6,0	20/10
			2	99,7	200	177804	5,68			
			3	100,2	199,8	188749	6			
2 - A/C = 0,31	28	E - 3321	1	100	200,2	200664	6,38	6,4	6,7	20/10
			2	100,4	200,2	198055	6,27			
			3	100,4	200	209813	6,65			
3 - A/C = 0,28	28	E - 3322	1	100,2	198,8	173725	5,55	5,9	6,9	20/10
			2	99,9	198,8	160663	5,15			
			3	100,3	198,6	216011	6,9			
4 - A/C = 0,26	28	E - 3323	1	100,5	200,8	204910	6,46	7,2	7,6	20/10
			2	100,2	201,1	234467	7,41			
			3	99,5	199,7	237076	7,6			
MÓDULO DE ELASTICIDADE										
FAIXA DE RESIST.	IDADE (DIAS)	REGISTRO DA AMOSTRA	CORPO DE PROVA	DIÂMETRO (mm)	ALTURA (mm)	RESIST. À COMPRESSÃO PREVISTA	RESIST. À COMPRESSÃO OBTIDA	MÓDULO DE ELASTICIDADE (GPa)	MÓDULO DE ELASTICIDADE EXEMPLAR(GPa)	MÓDULO DE ELASTICIDADE MÉDIO(GPa)
1 - A/C = 0,35	28	E - 3320	1	100	206	52,3	61,7	43,1	43,7	43,0
			2	101	205	52,3	65,9	42,3		
			3	101	204	52,3	67,5	43,7		
2 - A/C = 0,31	28	E - 3321	1	100	205	69	74	44,5	47,4	46,4
			2	101	207	69	69,8	47,4		
			3	100	209	69	68,5	47,3		
3 - A/C = 0,28	28	E - 3322	1	100	206	74,5	77,9	46,4	47,4	46,6
			2	101	203	74,5	79,6	46,1		
			3	100	203	74,5	70,1	47,4		
4 - A/C = 0,26	28	E - 3323	1	100	205	83	89	48,9	48,9	48,4
			2	100	204	83	98,3	48,8		
			3	100	204	83	96,1	47,6		

## ANEXO F

Caracterização mecânica concreto com 6% de pó de pedra.

RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO											
FAIXA DE RESIST.	IDADE (DIAS)	REGISTRO DA AMOSTRA	CORPO DE PROVA	DIÂMETRO (mm)	ALTURA (mm)	FORÇA MÁXIMA (N)	RESIST. À COMPRESSÃO	RESIST. DO EXEMPLAR	RESIST. MÉDIA	DATA DA RUPTURA	HORA DA RUPTURA
1 - A/C = 0,35	3	E - 3327	1	99,5	199,2	311438	40,1	43,0	40,5	30/10	9:50
			2	100,3	199	304279	38,5				
			3	99,7	198,8	335509	43				
2 - A/C = 0,31	3	E - 3328	1	100,4	200,4	395309	49,9	57,0	52,2	30/10	10:00
			2	99,8	199,5	446077	57				
			3	101,1	201	398350	49,6				
3 - A/C = 0,28	3	E - 3329	1	100	200	481873	61,4	62,9	59,9	30/10	10:15
			2	100,2	200,5	496364	62,9				
			3	100,8	201,1	441166	55,3				
4 - A/C = 0,26	3	E - 3330	1	101	199,8	490312	61,2	61,2	60,5	31/10	9:35
			2	100,8	200	481077	60,3				
			3	100,6	197,5	477619	60,1				
1 - A/C = 0,35	7	E - 3327	1	100	205,3	476650	60,7	60,7	58,2	3/11	13:13
			2	100,8	203,6	472293	59,2				
			3	99,9	205	428508	54,7				
2 - A/C = 0,31	7	E - 3328	1	100,5	204,6	552184	69,6	72,0	70,0	3/11	13:29
			2	100,5	206,5	542708	68,4				
			3	100,5	205,6	571379	72				
3 - A/C = 0,28	7	E - 3329	1	100,5	203,5	496018	62,5	82,2	73,8	3/11	13:46
			2	100	203,1	603232	76,8				
			3	100,3	204,6	649264	82,2				
4 - A/C = 0,26	7	E - 3330	1	99,6	197,3	513345	65,9	67,7	66,4	4/11	10:30
			2	99,5	199,3	526764	67,7				
			3	100,2	200	439610	65,7				
1 - A/C = 0,35	28	E - 3327	1	100,1	200,4	464684	59	59,0	57,5	24/11	11:36
			2	100,8	199,3	453029	56,8				
			3	100,2	200,3	446838	56,7				
2 - A/C = 0,31	28	E - 3328	1	99,8	198,8	582238	74,4	74,4	70,9	24/11	13:09
			2	100,2	198,9	571448	72,5				
			3	100,2	199,4	425153	65,9				
3 - A/C = 0,28	28	E - 3329	1	100,7	199,6	630761	79,2	79,2	73,0	24/11	13:28
			2	100,6	200,9	586389	73,8				
			3	100,2	200	442031	66,1				
4 - A/C = 0,26	28	E - 3330	1	100,5	199,5	352802	44,5	87,8	78,5	25/11	10:21
			2	100,4	199,2	695020	87,8				
			3	100,1	199,6	544057	69,1				

RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL										
FAIXA DE RESIST.	IDADE (DIAS)	REGISTRO DA AMOSTRA	CORPO DE PROVA	DIÂMETRO (mm)	ALTURA (mm)	CARGA DE RUPTURA (N)	TENSÃO DE RUPTURA (MPa)	RESIST. MÉDIA (MPa)	RESIST. DO EXEMPLAR (MPa)	DATA DA RUPTURA
1 - A/C = 0,35	28	E - 3327	1	100,7	201,4	149866	4,7	5,4	6,2	24/10
			2	100,7	199,5	194440	6,16			
			3	101,3	201,6	166847	5,2			
2 - A/C = 0,31	28	E - 3328	1	100,4	202,1	248994	7,81	7,3	7,8	24/10
			2	100,9	201,8	253240	7,19			
			3	100,9	203,9	224503	6,95			
3 - A/C = 0,28	28	E - 3329	1	100,8	201,3	184827	5,8	6,7	7,5	24/10
			2	100,5	203,2	240831	7,51			
			3	100,2	202	217972	6,86			
4 - A/C = 0,26	28	E - 3330	1	100	201	240096	7,6	6,9	7,9	20/10
			2	101	200,8	164500	5,16			
			3	100,6	200,9	228340	7,92			
MÓDULO DE ELASTICIDADE										
FAIXA DE RESIST.	IDADE (DIAS)	REGISTRO DA AMOSTRA	CORPO DE PROVA	DIÂMETRO (mm)	ALTURA (mm)	RESIST. À COMPRESSÃO PREVISTA	RESIST. À COMPRESSÃO OBTIDA	MÓDULO DE ELASTICIDADE (GPa)	MÓDULO DE ELASTICIDADE EXEMPLAR(GPa)	MÓDULO DE ELASTICIDADE MÉDIO(GPa)
1 - A/C = 0,35	28	E - 3327	1	101	198	59,1	64,8	51,2	52,5	46,8
			2	101	199	59,1	65	52,5		
			3	101	200	59,1	49,6	36,7		
2 - A/C = 0,31	28	E - 3328	1	100	200	74,4	87,4	49,6	51,9	50,3
			2	101	200	74,4	73,5	51,9		
			3	102	199	74,4	65,1	49,5		
3 - A/C = 0,28	28	E - 3329	1	100	200	79,2	49,4	28,5	48,4	41,0
			2	102	201	79,2	82,2	48,4		
			3	101	199	79,2	71,9	46,2		
4 - A/C = 0,26	28	E - 3330	1	100	201	87,8	83,1	51,8	51,9	50,9
			2	100	200	87,8	84,5	51,9		
			3	102	200	87,8	85	49		

## ANEXO G

Caracterização mecânica concreto com 12% de pó de pedra.

RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO											
FAIXA DE RESIST.	IDADE (DIAS)	REGISTRO DA AMOSTRA	CORPO DE PROVA	DIÂMETRO (mm)	ALTURA (mm)	FORÇA MÁXIMA (N)	RESIST. À COMPRESSÃO	RESIST. DO EXEMPLAR	RESIST. MÉDIA	DATA DA RUPTURA	HORA DA RUPTURA
1 - A/C = 0,35	3	E - 3331	1	100	199,7	459047	58,4	58,4	51,6	31/10	9:45
			2	99,9	200,7	371858	47,4				
			3	100,9	203,2	392920	49,1				
2 - A/C = 0,31	3	E - 3332	1	100,3	200,7	453894	57,4	57,4	54,9	31/10	10:00
			2	100,8	200	430791	54				
			3	100,9	202,6	425396	53,2				
3 - A/C = 0,28	3	E - 3333	1	100	198,7	421660	53,7	62,3	56,3	6/11	11:08
			2	100,6	199,7	495396	62,3				
			3	100,9	199,7	423009	52,9				
4 - A/C = 0,26	3	E - 3334	1	100	200,5	387871	49,4	66,7	57,6	6/11	10:23
			2	100,5	200,3	505149	66,7				
			3	100,2	200,5	367154	56,6				
1 - A/C = 0,35	7	E - 3331	1	100,2	200,8	405890	51,5	62,9	57,9	4/11	10:44
			2	100,5	200,6	498716	62,9				
			3	99,8	202,4	464995	59,4				
2 - A/C = 0,31	7	E - 3332	1	100	202	556438	70,8	73,9	72,0	4/11	10:58
			2	99,9	199,6	559032	71,3				
			3	100,5	201	586112	73,9				
3 - A/C = 0,28	7	E - 3333	1	100,7	199,9	534131	67,1	67,1	59,7	10/11	10:08
			2	100,4	199,5	452545	57,2				
			3	100,4	200,2	434906	54,9				
4 - A/C = 0,26	7	E - 3334	1	99,6	200,7	526176	77,5	82,8	78,7	10/11	10:23
			2	100,2	201,1	558029	82,8				
			3	100,2	201	596972	75,7				
1 - A/C = 0,35	28	E - 3331	1	100,1	200,2	476823	60,6	79,3	66,8	25/11	10:33
			2	99,8	200,1	620282	79,3				
			3	100,1	201,3	475855	60,5				
2 - A/C = 0,31	28	E - 3332	1	100	201,9	545233	69,4	86,1	77,8	25/11	10:46
			2	99,6	201,7	608108	78				
			3	100,2	201,5	678800	86,1				
3 - A/C = 0,28	28	E - 3333	1	100,4	201,6	464304	58,6	70,2	65,8	1/12	10:42
			2	100,2	199,6	553222	70,2				
			3	100,7	201	545855	68,5				
4 - A/C = 0,26	28	E - 3334	1	100,6	199,6	609042	76,6	88,1	82,4	1/12	10:54
			2	100,3	200,1	637056	88,1				
			3	100,9	199,3	448775	56,1				

RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL										
FAIXA DE RESIST.	IDADE (DIAS)	REGISTRO DA AMOSTRA	CORPO DE PROVA	DIÂMETRO (mm)	ALTURA (mm)	CARGA DE RUPTURA (N)	TENSÃO DE RUPTURA (MPa)	RESIST. MÉDIA (MPa)	RESIST. DO EXEMPLAR (MPa)	DATA DA RUPTURA
1 - A/C = 0,35	28	E - 3331	1	100,9	204,2	239198	7,39	7,1	7,4	24/10
			2	100,2	200,1	210625	6,69			
			3	100,4	201	231034	7,29			
2 - A/C = 0,31	28	E - 3332	1	100,3	200,2	259771	8,24	7,9	8,2	24/10
			2	100,3	202	237565	7,46			
			3	100,6	201,9	256995	8,06			
3 - A/C = 0,28	28	E - 3333	1	100,8	200,2	236269	7,45	6,6	7,5	1/12
			2	100,4	200,4	171939	5,44			
			3	100	199,6	216350	6,9			
4 - A/C = 0,26	28	E - 3334	1	100,7	201,4	231861	7,28	7,4	7,9	1/12
			2	100,1	200,8	225330	7,14			
			3	100,3	201,8	250148	7,87			
MÓDULO DE ELASTICIDADE										
FAIXA DE RESIST.	IDADE (DIAS)	REGISTRO DA AMOSTRA	CORPO DE PROVA	DIÂMETRO (mm)	ALTURA (mm)	RESIST. À COMPRESSÃO PREVISTA	RESIST. À COMPRESSÃO OBTIDA	MÓDULO DE ELASTICIDADE (GPa)	MÓDULO DE ELASTICIDADE EXEMPLAR(GPa)	MÓDULO DE ELASTICIDADE MÉDIO(GPa)
1 - A/C = 0,35	28	E - 3331	1	100	200	79,3	79,3	50,6	52,0	50,6
			2	100	201	79,3	66,9	49,2		
			3	101	205	79,3	57,6	52		
2 - A/C = 0,31	28	E - 3332	1	100	200	86,1	66,2	50,4	51,9	46,0
			2	100	200	86,1	84,4	35,6		
			3	101	202	86,1	61,6	51,9		
3 - A/C = 0,28	28	E - 3333	1	101	200	70,2	77,9	48,1	52,6	48,1
			2	101	200	70,2	58,9	43,5		
			3	101	200	70,2	74,2	52,6		
4 - A/C = 0,26	28	E - 3334	1	100	201	80,6	57,7	55	55,0	52,5
			2	101	201	80,6	69,2	50,2		
			3	101	201	80,6	72,9	52,3		

## ANEXO H

Caracterização mecânica concreto com 18% de pó de pedra.

RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO											
FAIXA DE RESIST.	IDADE (DIAS)	REGISTRO DA AMOSTRA	CORPO DE PROVA	DIÂMETRO (mm)	ALTURA (mm)	FORÇA MÁXIMA (N)	RESIST. À COMPRESSÃO	RESIST. DO EXEMPLAR	RESIST. MÉDIA	DATA DA RUPTURA	HORA DA RUPTURA
1 - A/C = 0,35	3	E - 3335	1	99,5	200,2	306769	39,5	41,2	40,5	7/11	10:02
			2	100	200,8	323785	41,2				
			3	100,1	201,3	320015	40,7				
2 - A/C = 0,31	3	E - 3336	1	100,6	202,5	419239	52,7	52,7	45,3	7/11	10:15
			2	98,1	199,8	323093	42,7				
			3	101	201,5	324269	40,5				
3 - A/C = 0,28	3	E-3337	1	100,2	198,9	374659	47,5	51,0	46,3	10/11	10:41
			2	99,8	200,2	315519	40,3				
			3	100,4	198,2	403399	51				
4 - A/C = 0,26	3	E-3338	1	100,3	200,2	409244	51,8	54,1	52,6	10/11	11:07
			2	99,9	201,1	405751	51,8				
			3	100,8	199,4	432070	54,1				
1 - A/C = 0,35	7	E-3335	1	100	204,2	402431	51,2	51,2	49,1	11/11	10:34
			2	100,6	203,7	384931	48,4				
			3	101,1	200,4	382925	47,7				
2 - A/C = 0,31	7	E-3336	1	100	200,9	384689	49	57,1	54,1	11/11	10:44
			2	99,8	200,8	439956	56,2				
			3	100,6	201,4	453651	57,1				
3 - A/C = 0,28	7	E-3337	1	100,6	198,9	467105	58,8	65,2	59,2	14/11	10:00
			2	100	200,3	421280	53,6				
			3	100,3	200,4	514763	65,2				
4 - A/C = 0,26	7	E-3338	1	100	200,8	497229	63,3	65,5	64,1	14/11	10:16
			2	100	200	499234	63,6				
			3	100,6	200,5	520677	65,5				
1 - A/C = 0,35	28	E-3335	1	99,4	199,9	430134	55,4	61,5	56,3	2/12	10:38
			2	99,7	200,6	404852	51,9				
			3	100,4	200,6	487130	61,5				
2 - A/C = 0,31	28	E-3336	1	99,9	198,6	478172	61	69,9	62,1	2/12	10:50
			2	100,7	200,8	557095	69,9				
			3	100	201,3	436151	55,5				
3 - A/C = 0,28	28	E-3337	1	100,3	200,8	571413	72,3	72,3	67,7	5/12	9:30
			2	99,7	198,6	529151	67,8				
			3	100,6	200,8	499995	62,9				
4 - A/C = 0,26	28	E-3338	1	100	199,3	532886	67,8	72,5	67,3	5/12	9:44
			2	99,8	201	482080	61,6				
			3	100,6	200,1	575875	72,5				

RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL										
FAIXA DE RESIST.	IDADE (DIAS)	REGISTRO DA AMOSTRA	CORPO DE PROVA	DIÂMETRO (mm)	ALTURA (mm)	CARGA DE RUPTURA (N)	TENSÃO DE RUPTURA (MPa)	RESIST. MÉDIA (MPa)	RESIST. DO EXEMPLAR (MPa)	DATA DA RUPTURA
1 - A/C = 0,35	28	E-3335	1	100,8	201,5	216829	6,8	5,9	6,8	2/12
			2	100,4	202,6	136335	4,27			
			3	100,3	201,8	214217	6,74			
2 - A/C = 0,31	28	E-3336	1	99,7	202,5	209155	6,6	6,4	7,6	2/12
			2	100,4	201,5	242627	7,64			
			3	100,2	199,6	152009	4,84			
3 - A/C = 0,28	28	E-3337	1	100,9	203,8	212911	6,59	6,3	6,6	5/12
			2	100,8	201,8	187440	5,87			
			3	100,2	200	206543	6,56			
4 - A/C = 0,26	28	E-3338	1	100,1	202,8	250627	7,86	6,7	7,9	5/12
			2	101	201,6	184664	5,77			
			3	100,4	202,2	202461	6,35			
MÓDULO DE ELASTICIDADE										
FAIXA DE RESIST.	IDADE (DIAS)	REGISTRO DA AMOSTRA	CORPO DE PROVA	DIÂMETRO (mm)	ALTURA (mm)	RESIST. À COMPRESSÃO PREVISTA	RESIST. À COMPRESSÃO OBTIDA	MÓDULO DE ELASTICIDADE (GPa)	MÓDULO DE ELASTICIDADE EXEMPLAR (GPa)	MÓDULO DE ELASTICIDADE MÉDIO (GPa)
1 - A/C = 0,35	28	E-3335	1	101	201	61,5	62,8	48,7	48,7	47,9
			2	100	202	61,5	59,6	48,3		
			3	101	200	61,5	53,3	46,7		
2 - A/C = 0,31	28	E-3336	1	101	202	70	61,3	47	49,0	47,9
			2	101	203	70	62,6	49		
			3	100	203	70	68,2	47,8		
3 - A/C = 0,28	28	E-3337	1	100	203	72,3	86,6	48	51,9	49,5
			2	101	200	72,3	86,6	51,9		
			3	99	204	72,3	87,5	48,5		
4 - A/C = 0,26	28	E-3338	1	101	204	72,5	87,7	47,6	50,4	48,8
			2	100	203	72,5	86,5	50,4		
			3	100	203	72,5	91,4	48,4		